



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE CUAUTITLAN

48
2ej.

"SELECCIÓN DE MATERIALES EN EL DISEÑO
CONTRA LA FALLA"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
^{Anselmo} **GILBERTO GOMEZ GARCIA**

ASESOR: ING. UBALDO E. MARQUEZ AMADOR

261003

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX. 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Selección de materiales en el diseño
contra la falla".

que presenta el pasante: Anselmo Gilberto Gómez García.
con número de cuenta: 7517853-6 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 1 de Septiembre de 1998

PRESIDENTE	<u>Ing. Soledad Alvarado Martínez</u>	
VOCAL	<u>Ing. Gerardo Maya Gómez</u>	<u>Maya Gerardo A.</u>
SECRETARIO	<u>Ing. Ubaldo E. Marquez Amador</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Enrique Cortés Gonzalez</u>	<u>Enrique</u>
SEGUNDO SUPLENTE	<u>M. en I. Felipe Díaz del Castillo</u>	

Dedico este trabajo:

A mis Padres:

Agradeciéndoles infinitamente por darme su comprensión y amor, para lograr esta anhelada meta.

A mis Hermanos:

Deseando con el corazón que su futuro sea brillante que siempre luchen por un ideal y que a pesar de todo comprendan que es posible alcanzar un objetivo por imposible que parezca

A mi Esposa:

Con amor y cariño ya que siempre en los momentos más difíciles sabe darme la fuerza necesaria para continuar con mis proyectos.

A mis Hijos:

Esperando que Dios les abra el camino para que en el futuro sean unos honestos y excelentes profesionistas.

A mis Familiares:

Expresándoles mi inmensa gratitud por su apoyo incondicional e inapreciables consejos.

Anselmo Gilberto

INDICE

SELECCIÓN DE MATERIALES EN EL DISEÑO CONTRA LA FALLA

CAPITULO 1

Introducción.

CAPITULO 2

El proceso de diseño.

2.1.- Introducción	8
2.2.- Diseño y tipos de diseño	9
2.2.1.- Diseño	9
2.2.2.- Tipos de diseño.	10
2.3.- Actividades del diseño	11
2.4.- El proceso de diseño	15
2.5.- Relación de los materiales en el proceso de diseño	27
2.6.- Conclusiones	31

CAPITULO 3

La selección de materiales.

3.1.- Introducción	33
3.2.- Materiales y sus propiedades	34
3.3.- Proceso para la selección de materiales	39
3.4.- Los criterios en la selección de materiales	44

CAPITULO 4

Análisis de falla.

4.1.- Introducción	58
4.1.1.- Definición y resistencia a la fractura	59
4.1.2.- Definición de fractura	62

4.1.3.- Definición de falla	62
4.1.4.- Factores que afectan a las fallas	63
4.2.- Fuentes fundamentales de fallas	63
4.2.1.- Imperfecciones en el material	63
4.2.2.- Iniciadores de fractura	65
4.2.3.- Deficiencias en la selección del material	65
4.2.4.- Uso inadecuado de los resultados de las pruebas mecánicas	65
4.3.- Deficiencias en el diseño	67
4.3.1.- Cambio en el diseño	67
4.3.2.- Selección del material	67
4.4.- Deficiencias en la manufactura	68
4.4.1.- Maquinado y esmerilado	68
4.4.2.- Marcas de identificación por impacto	68
4.4.3.- Maquinado a través de descargas eléctricas	68
4.4.4.- Fallas al realizar un tratamiento térmico	69
4.4.5.- Grietas por temple	69
4.4.6.- Retraso del agrietamiento por temple	69
4.4.7.- Fallas debidas a recubrimientos electrolíticos	70
4.4.8.- Arcos electrolíticos notables	70
4.4.9.- Fallas debidas a esfuerzos residuales	70
4.4.10.- Descarburización	71
4.4.11.- Decapado de los recubrimientos electrolíticos	71
4.4.12.- Soldadura	71
4.5.- Fallas como resultado de la fragilización	72
4.5.1.- Fragilización por envejecimiento por deformación	72
4.5.2.- Fragilización por envejecimiento en el temple	73
4.5.3.- Fragilidad azul	74
4.5.4.- Fragilización por revenido	74
4.5.5.- Fragilización a 350 °C	75
4.5.6.- Fragilización entre 400 y 500 °C	75

4.5.7.- Fragilización por la fase sigma	75
4.5.8.- Fragilización por grafitización	76
4.5.9.- Fragilización de aceros galvanizados	76
4.6.- Fragilización ambiental	77
4.6.1.- Fragilización por hidrógeno	77
4.6.2.- Agrietamiento por corrosión bajo tensión	77
4.6.3.- Fallas	78
4.6.4.- Fallas resultantes de muy bajas temperaturas	78
4.7.- Mecanismos de falla	80
4.7.1.- Identificación del tipo de fallas	80
4.7.2.- Clasificación por condiciones de carga	80
4.7.3.- Clasificación por la velocidad de crecimiento de grieta	80
4.7.4.- Clasificación por factores del medio ambiente	81
4.7.5.- Clasificación por examinación macroscópica	82
4.7.6.- Clasificación de observación microscópica	83
4.8.- Fracturas dúctiles	84
4.8.1.- Fractografía de fractura frágil	84
4.9.- Fracturas frágiles	85
4.9.1.- Fractografía de fracturas frágiles transgranulares	85
4.10.- Fallas por fatiga	86
4.10.1.- Predicción de la vida de fatiga	86
4.10.2.- Las curvas "S-N"	86
4.10.3.- Limite a la fatiga	87
4.10.4.- Características de la fractura que revela la macroscopia	88
4.10.5.- Marcas de playa	88
4.10.6.- Zona de fractura final	88
4.10.7.- Rasgos característicos de fatiga por microscopia	89
4.11.- Fallas por deformación excesiva	90
4.12.- Fallas por desgaste	90

4.12.1.- Desgaste adhesivo	91
4.12.2.- Desgaste abrasivo	92
4.12.3.- Desgaste erosivo	92
4.12.4.- Desgaste corrosivo	92
4.12.5.- Corrosión erosión	93
4.13.- Fallas por rozamiento	93
4.14.- Agrietamiento de corrosión bajo tensión	94
4.15.- Fluencia lenta o termofluencia	94

CAPITULO 5

Selección de materiales para evitar la falla.

5.1.- Introducción	96
5.2.- Mecánica de las fracturas	96
5.2.1.- Valor de la energía de deformación liberada	98
5.2.2.- Factor de intensidad de esfuerzo	100
5.2.3.- Diseño y resistencia a la fractura	101
5.2.4.- Kic criterio de la tenacidad en deformación plana	101
5.2.5.- Tablas de valores de Kic	105
5.3.- Selección de materiales sin tomar en cuenta la geometría	112
5.3.1.- Criterio de desempeño maximizado	115
5.3.2.- Restricciones múltiples	119
5.4.- Selección de materiales tomando en cuenta la geometría	122
5.4.1.- Factores de forma	123
5.4.2.- Índices de función en el cual se incluye la geometría	132
5.5.- Selección de materiales contra la falla	137

CAPITULO 6

Confiabilidad total

6.1.- Introducción	160
6.2.- Probabilidad en el diseño	162
6.2.1.- Probabilidad	162
6.2.2.- Notación de probabilidad	163
6.2.3.- Distribución de frecuencia	163
6.2.4.- La distribución normal	164
6.2.5.- Distribución de Weibull	165
6.2.6.- Distribución gamma	166
6.2.7.- Distribución exponencial	167
6.2.8.- Distribuciones de variables discretas	167
6.2.9.- Probabilidad en el diseño	169
6.2.10.- Variabilidad en las propiedades del material	171
6.3.- Aspectos probabilísticos de la mecánica de fractura	171
6.4.- Confiabilidad	175
6.4.1.- Índice de falla constante	179
6.4.2.- Índice de falla variable	180
6.4.3.- Sistema confiable	181
6.4.4.- Reparación y mantenimiento	183
6.4.5.- Índice de mantenimiento	184
6.5.- Confiabilidad para el diseño	186
6.6.- Conclusiones	192

CAPITULO 7

Conclusiones

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual se encuentra inmersa en una dinámica incesante en la que constantemente aparecen nuevos desarrollos tecnológicos o grandes avances a los ya existentes, para satisfacer las necesidades que día con día se van generando, lo que está exigiendo de los ingenieros una mayor aplicación creativa y un mejor aprovechamiento de los recursos naturales humanos, tecnológicos y materiales. Por ejemplo, en el diseño y construcción de puentes, donde se desea proporcionar un puente durable y resistente, en el que se permitirá el paso de una amplia variedad de vehículos. Los ingenieros de estos puentes usarán los conocimientos de las propiedades del concreto, acero y otros materiales, para tomar la decisión de como la estructura debe resistir los esfuerzos físicos causados por el viento, tráfico, calor y/o frío, así como el ataque químico de la contaminación del medio ambiente como la exposición a sales o a la humedad.

La experiencia ha demostrado que a pesar de contar con una selección de materiales "inteligentes" para la parte de diseño, las fallas siguen ocurriendo. Todas las plantas industriales, así como muchos edificios comerciales, edificios de departamentos, empresas de servicio público, y también las iglesias, cuentan con un Departamento de Mantenimiento, en el cuál se lleva a cabo, en su mayoría, el arreglo de todas aquellas cosas que han fallado en servicio, ya sea porque fueron diseñados utilizando un material equivocado o porque muchas de estas fallas se

debieron a la negligencia debida al sentido común de algunos lineamientos de diseño.

Se debe concentrar más en el diseño que en los materiales, cuando se traten algunos factores de diseño que pueden ayudar a realizar una "correcta" selección de materiales. Existen tres causas principales de falla en maquinaria y estructuras: Deformación plástica, Fractura mecánica y Desgaste. Algunos componentes sufren de dos o más de estos tipos de deterioro.

Las fallas en materiales se pueden deber a limitaciones en propiedades físicas, térmicas o químicas. Las fallas en los materiales no solamente involucran grandes sumas de dinero anualmente sino que contribuyen a la pérdida de vidas humanas. Muchas fallas en equipos, estructuras y en sistemas no son todas atribuibles a fallas de materiales, pero son el resultado de otros factores.

El encontrar la responsabilidad es crítico, no solamente como un elemento en juicios de responsabilidad sino es igualmente importante para un diseño en el futuro, reporte de especificaciones, modificaciones, selección de materiales, y en otras actividades. Un ejemplo clásico de análisis de falla es la investigación del desastre ocurrido en el Hotel Hyatt Regency, 1981, en el cual 113 personas murieron y además hubo muchos lesionados cuando unos andadores de concreto se colapsaron.

Un material dado contiene una jerarquía de niveles estructurales, desde los niveles atómico y electrónico hasta el nivel macroestructural. En todos estos niveles estructurales, la composición química y la distribución puede variar espacialmente. Estas estructuras y composiciones son el resultado de la síntesis y el procesamiento llevado a cabo para fabricar un material dado.

El punto crítico de los rápidos avances en la ciencia e ingeniería de materiales a lo largo de las recientes décadas ha sido el desarrollo continuo de herramientas más poderosas para explorar la estructura y la composición. Hace cincuenta años, las principales herramientas utilizadas fueron el microscopio óptico, la difracción de rayos x, y el espectroscopio infrarrojo y ultravioleta. Hoy en día, los investigadores tienen acceso a una cantidad enorme de nuevos instrumentos y tecnologías.

Históricamente, el desarrollo de los materiales ha involucrado muchos descubrimientos importantes hechos a un nivel macroscópico (tales como, el comportamiento continuo o propiedades mecánicas). En las últimas décadas, también se ha incrementado el énfasis sobre el nivel microscópico o atómico, tanto a nivel de investigación como en el de educación. Nuevas generaciones de ingenieros eléctricos, metalurgistas, químicos en polímeros y físicos en materia condensada, entienden los conceptos fundamentales generales de todos los tipos de materiales, y se sigue dando un incremento en el entendimiento de los conceptos fundamentales. Hace algunos años, por ejemplo, en la aparentemente bien definida ciencia de la cristalografía geométrica se tambaleó debido al descubrimiento de un nuevo sistema de simetría de cristales en sólidos, cuyo estudio llevó a un más profundo entendimiento de las condiciones que llevan a diferentes arreglos atómicos.

Se ha dado un nuevo énfasis, en los centros de ingeniería y ciencia de materiales, al estudio de los materiales en un sistema de tamaño de nanómetros, el cuál es un nivel intermedio entre los niveles macroscópico y atómico. Los

estudios de síntesis y procesamiento se han enfocado cada vez más en el sistema de tamaño en nanómetros, como se ha demostrado mediante el desarrollo de bloques de copolímeros, de polvos ultrafinos de cerámica, microestructuras metálicas, y dispositivos electrónicos de superredes.

Los términos de *síntesis* y *procesamiento* se refieren a la construcción de nuevos arreglos de los átomos, moléculas, y aglomerados moleculares; el control de la estructura a todos los niveles desde la atómica hasta la macroscópica; y el desarrollo de los procesos para producir materiales y componentes efectiva y competitivamente. El término *síntesis* es comúnmente empleado solamente para referirse a los medios físicos y químicos mediante los cuales se unen los átomos y las moléculas. El término *procesamiento* puede ser utilizado en una manera similar, por ejemplo, en la frase *procesamiento electrónico de materiales*. El procesamiento también puede implicar cambios a una gran escala, incluyendo la manufactura de materiales. A menudo se utiliza en manipulaciones macroscópicas, tales como solidificación de lingotes, modificaciones mecánicas, sinterizado, y uniones. Estas manipulaciones macroscópicas, por supuesto, también pueden causar cambios estructurales importantes a niveles de átomos y de granos.

La investigación de la síntesis y el procesamiento está evolucionando hasta un punto tal en que, en algunos casos, se pueden crear nuevos materiales según los requerimientos, átomo por átomo, hasta llegar a obtener el conjunto de propiedades deseadas o hasta obtener nuevos y algunas veces fenómenos inesperados. La síntesis y el procesamiento encierran un arreglo comprensible de técnicas y tecnologías tan diversas como el laminado de hojas de acero, el

prensado y sinterizado de polvos cerámicos, los implantes iónicos de silicio, la creación de materiales artificialmente estructurados, el refinamiento del acero por colada, la fabricación de gel sólido de polvos finos de cerámica, el vaciado de concreto modificado por polímero, el dar forma por el proceso de maquinado o viruta, el procesamiento termomecánico de aleaciones, la preparación de polímeros mediante reacciones químicas, el revestimiento de paletas de turbinas para la resistencia a la corrosión, el refinamiento por zona del sílice, y la formación de capas en los materiales compuestos. Algunas de estas tecnologías son relativamente nuevas y pueden, con el tiempo, llevar a mayores avances tecnológicos y a un crecimiento industrial. Otros son más bien son utilizados para el establecimiento de industrias pero requieren mejoras continuas si es que las industrias que se atienen a ellas quieren mantenerse a nivel competitivo con otras.

La síntesis y el procesamiento también representan una gran área de investigación básica en la ciencia e ingeniería de los materiales. De esta investigación básica se obtienen materiales completamente nuevos, por ejemplo, nuevos polímeros conductores, nuevas composiciones de superconductores cerámicos, cristales simples libres de dislocaciones, y materiales estructurados artificialmente. Otro empuje importante en la investigación básica del procesamiento es el desarrollo del fenómeno dinámico que se lleva cabo en el procesamiento de materiales, para que sirva de base para los cambios y mejoras del procesamiento. Ejemplos de tal fenómeno son el comportamiento reológico en el llenado de un dado, el mecanismo atómico del crecimiento del grano, el mecanismo atómico de la remoción de materiales en el maquinado, y el mecanismo de transportación de masa en los procesos de consolidación.

La eficiencia del procesamiento no sólo es esencial dentro de la competitividad industrial, sino que además posee muchos problemas intelectuales. Las investigaciones básicas dirigidas al incremento del entendimiento del crecimiento de cristales, de la deposición por medio de vapor, del sinterizado, de las transformaciones de fase, la reología, y otros procesos genéricos claves para la manufactura pueden tener efectos profundos en la productividad. Estas investigaciones pueden ser particularmente valiosas cuando pueden ser extendidas al desarrollo de modelos de procesos de tiempo real que pueden ser utilizados en el control de procesos.

Este estudio está encaminado a realizar una mejor selección de materiales en el Diseño Mecánico para así evitar la falla, esto se logrará a través del análisis de los siguientes capítulos en donde básicamente el capítulo 2 habla del Proceso de Diseño desde sus generalidades, tipos de diseños, actividades del diseño y lo que es el proceso de diseño, tema central de este capítulo. En el 2.5 veremos la relación de los materiales en el proceso de diseño, que también será una introducción al capítulo 3 que se llama la Selección de Materiales. En este capítulo el tema central se encuentra en el apartado 3.4 donde tenemos 5 criterios principales para seleccionar el material, por lo que nos apoyaremos principalmente en el Análisis de Falla que se estudia más profundamente en el capítulo 4, este es un tema bastante técnico donde se explican los tipos de falla que existen y sus características.

El capítulo central de la tesis es el numero 5 en el cual se analiza la Selección de Materiales contra la Falla en los subtemas 5.3 y 5.4 donde se habla

de la selección de materiales sin tomar en cuenta la geometría y también claro está cuando la tomamos en cuenta.

En el subtema 5.5 se habla de los tipos de ensayos no destructivos, cartas de modos de fallas, tablas donde se relacionan tipos de falla con respecto a las propiedades del material y un cuestionario donde ya realizado el análisis de falla además de toda la información que podemos obtener podemos concluir de quien fue la falla, ya sea por el diseño, el material, el exceso de los límites del diseño u otros factores.

Esto sería en el caso de que ya haya ocurrido la falla y usarlo para prevenir que no vuelva a ocurrir. Asimismo a lo largo de la tesis se van dando varios criterios para seleccionar el material óptimo.

Finalmente el capítulo 6 trata acerca de la Confiabilidad Total donde se hace un análisis probabilístico para poder medir aspectos de la mecánica de fracturas y así poder incrementar más la confiabilidad de nuestro diseño.

En síntesis los objetivos de nuestro trabajo son el de aportar una metodología clara y concreta para la correcta selección de un material para evitar la falla y por otro lado sentar las bases para un estudio más completo en donde se desarrollará, el análisis de falla pero por medio de la elaboración de sistemas expertos, no incluido en este trabajo.

CAPITULO 2

EL PROCESO DE DISEÑO

2.1. - Introducción (Generalidades)

El hombre, a través de su historia, ha buscado siempre su bienestar y comodidad, por ejemplo en la antigüedad cuando cazaba, primero lo hizo con palos, después se dio cuenta de que si le daba forma de punta al palo penetraba en el animal más fácilmente. Este, es solo un aspecto que sucedió en la vida del hombre y así sucedieron muchos más, el mismo hombre fue diseñando sus aparatos y rediseñándolos sin darse cuenta que cada necesidad que satisfacía lo realizaba con la ayuda del diseño.

En la actualidad el hombre sigue diseñando y básicamente sigue el mismo principio en el cual surge una necesidad del mismo ser humano o de la sociedad, la cual concluye con la satisfacción de la necesidad mediante el diseño. Más adelante hablaremos a detalle del proceso de diseño.

El hombre siempre ha utilizado los recursos y las leyes de la naturaleza para beneficiar a la humanidad. El diseño trata de solucionar problemas reales aunque también hace uso del sentido común. Gran parte de la problemática del diseño no tiene una solución única, algunas veces existen varios diseños aceptables que dan solución al problema, por lo cual el hombre debe de buscar el mejor diseño.

Es importante mencionar que para la realización de un buen diseño se debe de identificar al 100% la necesidad para poder llevar a cabo un buen desarrollo y no desviarse del objetivo o necesidad.

A partir de estas definiciones, de otras más consultadas y experiencias propias, podemos volver y dar nuestra respuesta a la pregunta inicial.

¿Que es diseño?

Es una habilidad que involucra ciencia y arte, que encamina a desarrollar ciertos procedimientos con los cuales se crean soluciones a una necesidad humana.

En la definición se menciona ciencia y arte de las cuales podemos decir que, la ciencia se puede aprender a través de técnicas y procedimientos en varios cursos, por otra parte el arte puede ser aprendido realizando diseño.

El diseño se relaciona muchas veces con la creación de algo que jamás ha existido, pero esto es solo una parte del diseño ya que existen varios tipos de diseño, como se verá a continuación.

2.2.2.-Tipos de diseño.

Antes de hablar sobre etapas y acciones a tomar en el diseño será necesario identificar los tipos básicos de diseño. Estos se pueden clasificar en tres tipos:

a) Diseño original.

El objetivo de este diseño es el de buscar un diseño novedoso, esto implica que su principio de funcionamiento no existe, lo cual involucra trabajar o desarrollar este nuevo principio. El diseñador debe considerar todas las soluciones posibles al problema planteado, ya que como sabemos "La mejor manera de obtener una buena idea es tener muchas ideas" por lo tanto el diseñador debe ampliar sus pensamientos lo más que pueda.

b) Diseño adaptativo o evolutivo.

En este diseño el principio de funcionamiento ya existe pero se busca una mejora en el diseño, un avance o una evolución en su funcionalidad, todo esto a

artículo, producto o maquinaria, todo esto para enterarse de la identidad, naturaleza y circunstancias que lo rodea.

Las necesidades son identificadas por la sociedad, y son difundidas a través de varios medios, ya sea por consumidores, agentes de ventas, encuestadores, agencias gubernamentales, operadores de maquinaria, etc.

La importancia de esta actividad es tal que se puede decir que es la esencia del diseño, ya que como se vio en la definición lo importante es satisfacer una necesidad.

2. Definir el problema.

La definición del problema es sin lugar a dudas la actividad crítica en el diseño, ya que de esta definición depende el éxito del diseño, si no se define bien el problema, podemos estar diseñando algo que en realidad no es lo que se quiere.

En la definición del problema se deben definir los objetivos, metas, requerimientos, lo que no se desea del producto a diseñar, todo se debe hacer lo más específico posible y se debe realizar un escrito formal del problema.

En esta actividad se deben definir todo lo antes mencionado, pero en lo que hay que trabajar más es en la definición de nuestra meta, a lo que se quiere llegar, ya que muchas veces el problema no es lo que a simple vista parece, y depende mucho del punto de vista del diseñador.

La meta debe definirse lo más simple y clara posible, se puede tomar como ejemplo el nacimiento de la aspiradora, en la cual la meta se definió como "crear un aparato para quitar el polvo de las alfombras del hogar".

satisfacción de la necesidad. Es donde empieza a utilizarse las inventivas así como la creatividad para el desarrollo del diseño.

En la conceptualización interviene la formulación de un modelo, el cual generalmente es de dos tipos, analítico y experimental.

Lo primordial de la conceptualización es la realización de la síntesis, la cual puede ser definida como la acción de tomar los elementos del concepto planteado, y conjuntarlos en un adecuado orden, lógica, dimensionamiento, etc.

Para encaminar la correcta solución del problema. La conceptualización es un proceso creativo y está presente en cada diseño.

5. Evaluación.

Esta actividad se desarrolla en todas las etapas del diseño. La evaluación involucra el desarrollo de cálculos a detalle del diseño partiendo del modelo analítico, este cálculo generalmente es matemático donde se revisan las ecuaciones utilizadas, operaciones, etc. Existe otro tipo de evaluación el cual es considerado o llamado "sentido ingenieril" que surge cuando el diseñador se pregunta si sus cálculos se ven lógicos, por ejemplo si al estar diseñando encontramos un esfuerzo de tracción de 1000 MPa para el aluminio, sabemos que algo anda mal, un parámetro útil para el "sentido ingenieril" es el establecer límites para ciertos cálculos en el diseño. Aquí la selección de materiales contra la falla juega un gran papel.

6. Comunicación del diseño.

Algo muy importante para el desarrollo de un buen diseño es la comunicación que existe entre las personas que integran el equipo de diseño, como se vea en

c) Fabricación (Producción).

d) Servicio.

a) Diseño conceptual.

El propósito es inicializar el diseño y establecer las líneas de pensamiento, la meta en este proceso es validar la necesidad, producir las posibles soluciones, evaluar estas posibles soluciones, establecer si el producto vale la pena económicamente, así como cuantificar los parámetros para establecer la solución óptima. En esta etapa todas las opciones están abiertas, el diseñador debe considerar todas las alternativas sobre el principio de funcionamiento o la combinación de las funciones con las cuales se realiza el sistema, establecer la forma en la cual las subfunciones son separadas y combinadas para el mejor funcionamiento del sistema.

En el diseño conceptual se debe desarrollar una lista de todos los requerimientos que afectan al producto, la lista debe hacerse usando las mismas palabras del cliente: "fácil", "rápido", "pequeño" y otros términos abstractos, se deben plantear asimismo los requerimientos de funcionamiento, de apariencia, de tiempo, de costo, de seguridad, medio ambiente, etc. Una vez elaborada la lista es necesario determinar la importancia relativa de los requerimientos, en los que existen dos niveles de importancia, los que se deben de satisfacer a toda costa "indispensables" y los que son buenos que se realicen (no 100% necesarios) son "deseables". Con la determinación de la importancia relativa de los requerimientos se procede a traducirlos en requerimientos de ingeniería "especificaciones de diseño" en donde se trata de hacer que cada requerimiento de diseño sea medible, si esto no es posible se tendrá que redefinir el requerimiento.

En esta etapa el equipo de trabajo está integrado por ingenieros de diseño de detalle, los cuales elaboran toda la documentación basada en cálculos para la manufactura y ensamble del producto, intervienen también los llamados calculistas y dibujantes.

Como resumen se puede decir que lo importante en el diseño de detalle es realizar:

- * Planos de fabricación de componentes.
- * Planos de ensamble.
- * Calculo de conceptos mecánicos.
- * Selección de componentes mecánicos.

b) Fabricación (producción).

En esta etapa se procede a utilizar la información obtenida anteriormente para llevar a cabo la fabricación del producto. Un método de manufactura debe establecerse para cada componente en el sistema. Usualmente como primer paso se debe de establecer una hoja de proceso o ruta de trabajo, en donde contenga una lista secuencial de las operaciones de manufactura a emplear en los componentes. También se establecen las especificaciones y condiciones del material, herramientas, máquinas de producción a usar. La información de las hojas de proceso nos permiten conocer aproximadamente el costo de producción del producto, un alto costo indica un cambio en material, proceso de fabricación o un cambio básico de diseño. Otras tareas importantes a realizar en la producción son:

- * Diseño especializado de herramientas y accesorios.

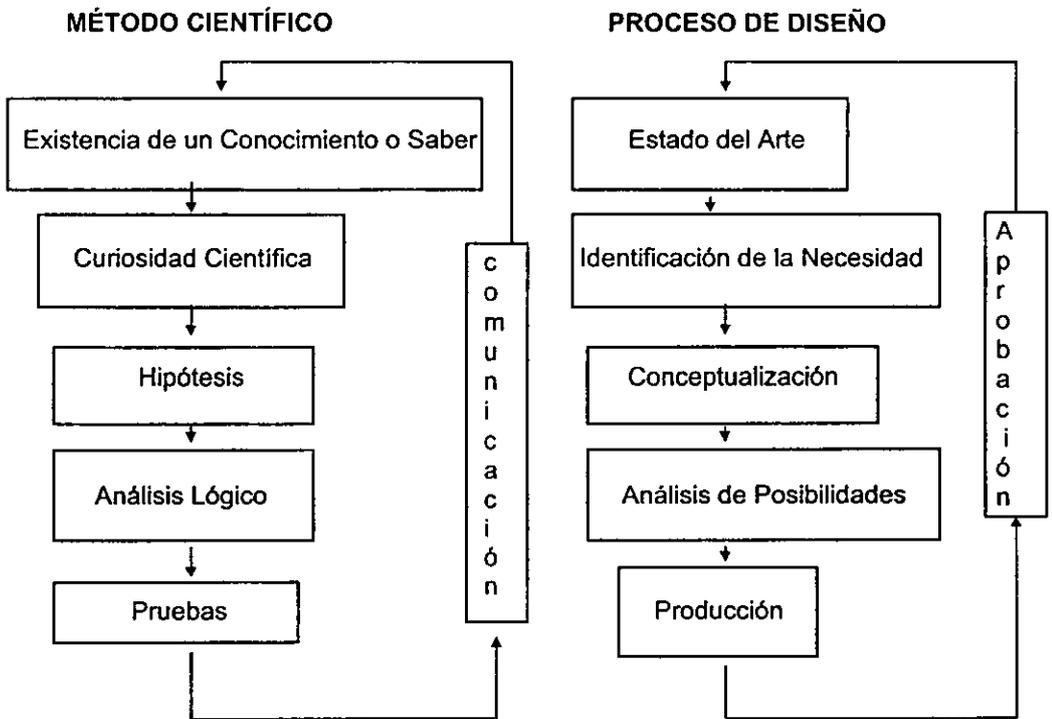


Figura 2.1. Comparación entre el Método Científico y el Proceso de Diseño.

El método científico empieza con la existencia de un conocimiento o saber. El científico tiene curiosidad de ciertas preguntas y con esto formula una hipótesis. La hipótesis es sometida a un análisis lógico que la confirma o la niega. Algunas veces el análisis revela inconsistencias con lo que la hipótesis tiene que ser cambiada en un proceso iterativo. Finalmente, cuando la nueva idea es comprobada se acepta como prueba por los científicos.

El proceso de diseño es muy similar al método científico. El proceso de diseño empieza con el estado del arte, después existe una curiosidad científica que realmente viene a dar con la identificación de la necesidad. Cuando la necesidad es identificada

CAPITULO 2

EL PROCESO DE DISEÑO

2.1. - Introducción (Generalidades)

El hombre, a través de su historia, ha buscado siempre su bienestar y comodidad, por ejemplo en la antigüedad cuando cazaba, primero lo hizo con palos, después se dio cuenta de que si le daba forma de punta al palo penetraba en el animal más fácilmente. Este, es solo un aspecto que sucedió en la vida del hombre y así sucedieron muchos más, el mismo hombre fue diseñando sus aparatos y rediseñándolos sin darse cuenta que cada necesidad que satisfacía lo realizaba con la ayuda del diseño.

En la actualidad el hombre sigue diseñando y básicamente sigue el mismo principio en el cual surge una necesidad del mismo ser humano o de la sociedad, la cual concluye con la satisfacción de la necesidad mediante el diseño. Más adelante hablaremos a detalle del proceso de diseño.

El hombre siempre ha utilizado los recursos y las leyes de la naturaleza para beneficiar a la humanidad. El diseño trata de solucionar problemas reales aunque también hace uso del sentido común. Gran parte de la problemática del diseño no tiene una solución única, algunas veces existen varios diseños aceptables que dan solución al problema, por lo cual el hombre debe de buscar el mejor diseño.

Es importante mencionar que para la realización de un buen diseño se debe de identificar al 100% la necesidad para poder llevar a cabo un buen desarrollo y no desviarse del objetivo o necesidad.

En este capítulo se hablará de lo que es el diseño y los tipos de diseño existentes, trataremos también de la filosofía del diseño en el cual se verán las acciones o actividades del diseño, luego continuaremos con el proceso de diseño que involucra los pasos a seguir para realizar cualquier diseño, como penúltimo subtema, se hablará de la relación de los materiales en el proceso de diseño con el cual nos empezamos a involucrar con la selección de materiales que se verá en el siguiente capítulo.

2.2. – Diseño y tipos de diseño

2.2.1.-Diseño.

¿Que es diseño?. Buena pregunta para empezar a hablar del tema; el buscar la respuesta involucra encontrar una serie de definiciones tan amplia como diseños existentes; esto se debe quizá a que el diseño es como una experiencia humana común, es decir, cada quien puede tener una definición diferente, pero todas con la misma esencia, más aún para el ingeniero ya que puede decirse que el diseño es la esencia de la ingeniería. El diseño es conjuntar cosas nuevas o ya existentes orientadas a un nuevo camino para satisfacer una necesidad.

Algunas definiciones aceptadas para el diseño son las de Morris Asimow y J. F Blumrich que se citan a continuación respectivamente:

“Actividad dirigida a la satisfacción de necesidades humanas particularmente aquellas que puedan ser cubiertas utilizando los factores tecnológicos de nuestra cultura”.

El diseño establece y define soluciones estructuradas pertinentes para problemas no resueltos anteriormente, o nuevas soluciones a problemas que han sido resueltos en una forma diferente.

A partir de estas definiciones, de otras más consultadas y experiencias propias, podemos volver y dar nuestra respuesta a la pregunta inicial.

¿Que es diseño?

Es una habilidad que involucra ciencia y arte, que encamina a desarrollar ciertos procedimientos con los cuales se crean soluciones a una necesidad humana.

En la definición se menciona ciencia y arte de las cuales podemos decir que, la ciencia se puede aprender a través de técnicas y procedimientos en varios cursos, por otra parte el arte puede ser aprendido realizando diseño.

El diseño se relaciona muchas veces con la creación de algo que jamás ha existido, pero esto es solo una parte del diseño ya que existen varios tipos de diseño, como se verá a continuación.

2.2.2.-Tipos de diseño.

Antes de hablar sobre etapas y acciones a tomar en el diseño será necesario identificar los tipos básicos de diseño. Estos se pueden clasificar en tres tipos:

a) Diseño original.

El objetivo de este diseño es el de buscar un diseño novedoso, esto implica que su principio de funcionamiento no existe, lo cual involucra trabajar o desarrollar este nuevo principio. El diseñador debe considerar todas las soluciones posibles al problema planteado, ya que como sabemos "La mejor manera de obtener una buena idea es tener muchas ideas" por lo tanto el diseñador debe ampliar sus pensamientos lo más que pueda.

b) Diseño adaptativo o evolutivo.

En este diseño el principio de funcionamiento ya existe pero se busca una mejora en el diseño, un avance o una evolución en su funcionalidad, todo esto a

través de la perfección del principio del funcionamiento, también basados en este principio se pueden hacer modificaciones para realizar una tarea diferente.

Todas estas acciones implican un diseño adaptativo o evolutivo.

c) Diseño de Variantes.

El diseño de variantes también llamado rediseño busca un cambio en escala, dimensiones, capacidad o algunos detalles de un diseño anterior. Lo importante en el rediseño es no afectar el principio de funcionamiento el cual debe ser el mismo que en el diseño anterior.

2.3. – Actividades del diseño.

El diseño involucra ciertas actividades que son necesarias desarrollar durante todo el proceso de diseño.

Estas actividades son las siguientes:

1. -Reconocer la necesidad.
2. -Definir el problema.
3. -Obtención de información.
4. -Conceptualización.
5. -Evaluación.
6. -Comunicación del diseño (información).

1.- Reconocer la necesidad.

Todo diseño siempre parte de necesidades de mercado ó algo que no está funcionando bien. El reconocer la necesidad involucra el analizar y darse cuenta de que algo está faltando para el bienestar y comodidad de la sociedad así como examinar y estar conscientes de que existe algún problema o falla en algún

artículo, producto o maquinaria, todo esto para enterarse de la identidad, naturaleza y circunstancias que lo rodea.

Las necesidades son identificadas por la sociedad, y son difundidas a través de varios medios, ya sea por consumidores, agentes de ventas, encuestadores, agencias gubernamentales, operadores de maquinaria, etc.

La importancia de esta actividad es tal que se puede decir que es la esencia del diseño, ya que como se vio en la definición lo importante es satisfacer una necesidad.

2. Definir el problema.

La definición del problema es sin lugar a dudas la actividad crítica en el diseño, ya que de esta definición depende el éxito del diseño, si no se define bien el problema, podemos estar diseñando algo que en realidad no es lo que se quiere.

En la definición del problema se deben definir los objetivos, metas, requerimientos, lo que no se desea del producto a diseñar, todo se debe hacer lo más específico posible y se debe realizar un escrito formal del problema.

En esta actividad se deben definir todo lo antes mencionado, pero en lo que hay que trabajar más es en la definición de nuestra meta, a lo que se quiere llegar, ya que muchas veces el problema no es lo que a simple vista parece, y depende mucho del punto de vista del diseñador.

La meta debe definirse lo más simple y clara posible, se puede tomar como ejemplo el nacimiento de la aspiradora, en la cual la meta se definió como "crear un aparato para quitar el polvo de las alfombras del hogar".

3. - Obtención de información.

Un diseño siempre debe estar fundamentado esto es, se debe saber en que se basa su principio de funcionamiento, los materiales a emplear para evitar la falla, el proceso de manufactura etc. Para esto se debe tener un conocimiento previo sobre varias áreas, pero es muy importante también tener una buena información para poder apoyarnos y respaldar nuestro diseño. De ahí se ve la importancia de conseguir información cuando se diseña.

El obtener la información no es una tarea sencilla e implica una búsqueda, obtención, selección e interpretación de ésta. Existen muchas actividades y dudas que resultan al ir obteniendo la información, es importante saber que existen varias fuentes de información, como son revistas técnicas, reportes de compañías, catálogos, patentes, información proveniente de proveedores, información vía Internet, es muy importante saber si podemos tener acceso a ellas debido a que cierta información está reservada solo para miembros de asociaciones, colegios, u otras dependencias, así como también saber si estas dependencias tienen experiencia o son de prestigio para saber que tan creíble y exacta es la información que obtenemos, ya que varias de las decisiones resultan de la información obtenida por lo cual también hay que saber como interpretar la información para el problema específico.

Como se ve el éxito del diseño depende mucho de la información que tengamos al respecto, ya que de ésta resulta la conceptualización del diseño.

4. Conceptualización.

Esta actividad involucra una integración que determina los elementos, mecanismos, procesos que en alguna u otra combinación encamina a la

satisfacción de la necesidad. Es donde empieza a utilizarse las inventivas así como la creatividad para el desarrollo del diseño.

En la conceptualización interviene la formulación de un modelo, el cual generalmente es de dos tipos, analítico y experimental.

Lo primordial de la conceptualización es la realización de la síntesis, la cual puede ser definida como la acción de tomar los elementos del concepto planteado, y conjuntarlos en un adecuado orden, lógica, dimensionamiento, etc.

Para encaminar la correcta solución del problema. La conceptualización es un proceso creativo y está presente en cada diseño.

5. Evaluación.

Esta actividad se desarrolla en todas las etapas del diseño. La evaluación involucra el desarrollo de cálculos a detalle del diseño partiendo del modelo analítico, este cálculo generalmente es matemático donde se revisan las ecuaciones utilizadas, operaciones, etc. Existe otro tipo de evaluación el cual es considerado o llamado "sentido ingenieril" que surge cuando el diseñador se pregunta si sus cálculos se ven lógicos, por ejemplo si al estar diseñando encontramos un esfuerzo de tracción de 1000 MPa para el aluminio, sabemos que algo anda mal, un parámetro útil para el "sentido ingenieril" es el establecer límites para ciertos cálculos en el diseño. Aquí la selección de materiales contra la falla juega un gran papel.

6. Comunicación del diseño.

Algo muy importante para el desarrollo de un buen diseño es la comunicación que existe entre las personas que integran el equipo de diseño, como se vera en

el proceso de diseño este es un proceso iterativo, por lo cual debe de haber la mayor comunicación entre la gente que forma el grupo de diseño.

La comunicación usualmente es por presentación oral, pero debe tenerse siempre un escrito formal o reporte para mayor entendimiento, debe haber dibujos detallados de ingeniería, programas de cómputo, bosquejos, lo que más ilustre las ideas del diseñador. Con la ayuda de la computadora se establecen redes de éstas, para la mejor comunicación y que todos los del equipo puedan compartirla y trabajar al mismo tiempo.

2.4. – El proceso de diseño.

Para el desarrollo del diseño es necesario seguir cierto procedimiento, el cual se describirá a continuación, cabe mencionar que las actividades descritas anteriormente no forman el proceso de diseño, si no que solo son actividades que se desarrollan durante todo el proceso.

El diseño es un proceso iterativo, no hay una secuencia universal asumida de pasos que permitan que un diseño sea adecuado, sin embargo el punto de partida siempre es la necesidad de mercado o una idea siendo el paso final un producto que satisfaga la necesidad o que integre la idea inicial. Entre estos dos puntos existen una serie de pasos que intervienen y forman el llamado proceso de diseño, muchos diseñadores han descrito el proceso en tan solo 3 pasos, algunos otros lo describen en hasta 25 pasos.

Una de las formas más simples que hemos encontrado para elaborar un diseño es desarrollarlo en 4 pasos que integran el proceso de diseño los cuales son:

- a) Diseño conceptual.
- b) Diseño de detalle.

c) Fabricación (Producción).

d) Servicio.

a) Diseño conceptual.

El propósito es inicializar el diseño y establecer las líneas de pensamiento, la meta en este proceso es validar la necesidad, producir las posibles soluciones, evaluar estas posibles soluciones, establecer si el producto vale la pena económicamente, así como cuantificar los parámetros para establecer la solución óptima. En esta etapa todas las opciones están abiertas, el diseñador debe considerar todas las alternativas sobre el principio de funcionamiento o la combinación de las funciones con las cuales se realiza el sistema, establecer la forma en la cual las subfunciones son separadas y combinadas para el mejor funcionamiento del sistema.

En el diseño conceptual se debe desarrollar una lista de todos los requerimientos que afectan al producto, la lista debe hacerse usando las mismas palabras del cliente: "fácil", "rápido", "pequeño" y otros términos abstractos, se deben plantear asimismo los requerimientos de funcionamiento, de apariencia, de tiempo, de costo, de seguridad, medio ambiente, etc. Una vez elaborada la lista es necesario determinar la importancia relativa de los requerimientos, en los que existen dos niveles de importancia, los que se deben de satisfacer a toda costa "indispensables" y los que son buenos que se realicen (no 100% necesarios) son "deseables". Con la determinación de la importancia relativa de los requerimientos se procede a traducirlos en requerimientos de ingeniería "especificaciones de diseño" en donde se trata de hacer que cada requerimiento de diseño sea medible, si esto no es posible se tendrá que redefinir el requerimiento.

Una parte importante dentro de ésta fase es la planeación del proyecto en donde se establecen todas las actividades, el objetivo a seguir para cada actividad, el personal requerido, costos, etc. Una herramienta útil para la planeación del proyecto es utilizar la llamada tabla de Gantt.

La primera etapa del diseño conceptual nos ayudó a entender y definir el problema del diseño que deseamos resolver. Ahora la meta será utilizar este conocimiento para generar conceptos que nos lleven a desarrollar un producto de calidad. Entre más conceptos se generen más exitoso será el diseño. Hay varias técnicas para la generación de conceptos, una de las más utilizadas es la descomposición funcional donde se realiza un refinamiento de los requerimientos de funcionamiento en la cual se genera un enunciado que describa las funciones que debe realizar la máquina, procediendo después a la descomposición de la función en subfunciones que nos ayuda a idear una secuencia lógica de acciones, y ayuda a estructurar mejor nuestras ideas.

b) Diseño de detalle.

El propósito del diseño de detalle es desarrollar una descripción completa de ingeniería, interviene una evaluación, un análisis a detalle del componente que integra la máquina, un análisis de los materiales para evitar la falla, se realizan los planos de fabricación de los componentes, se elaboran los planos de ensamble, se desarrolla el modelo analítico generado en donde se elabora el uso de ecuaciones para el diseño de cada elemento, cabe recordar que todos los planos deben incluir todos los elementos ya dimensionados, con tolerancias y especificaciones.

En esta etapa el equipo de trabajo está integrado por ingenieros de diseño de detalle, los cuales elaboran toda la documentación basada en cálculos para la manufactura y ensamble del producto, intervienen también los llamados calculistas y dibujantes.

Como resumen se puede decir que lo importante en el diseño de detalle es realizar:

- * Planos de fabricación de componentes.
- * Planos de ensamble.
- * Calculo de conceptos mecánicos.
- * Selección de componentes mecánicos.

b) Fabricación (producción).

En esta etapa se procede a utilizar la información obtenida anteriormente para llevar a cabo la fabricación del producto. Un método de manufactura debe establecerse para cada componente en el sistema. Usualmente como primer paso se debe de establecer una hoja de proceso o ruta de trabajo, en donde contenga una lista secuencial de las operaciones de manufactura a emplear en los componentes. También se establecen las especificaciones y condiciones del material, herramientas, máquinas de producción a usar. La información de las hojas de proceso nos permiten conocer aproximadamente el costo de producción del producto, un alto costo indica un cambio en material, proceso de fabricación o un cambio básico de diseño. Otras tareas importantes a realizar en la producción son:

- * Diseño especializado de herramientas y accesorios.

- * Especificación de la planta de producción y la distribución de las líneas de producción.
- * Planear los horarios de trabajo así como el control de inventarios.
- * Establecer un sistema de control de calidad.
- * Realizar pruebas.

c) Servicio.

Esta etapa no era considerada con gran detalle anteriormente, pero debido al surgimiento de la competencia, la protección del consumidor, las nuevas legislaciones en cuanto a seguridad, la opinión del usuario es un parámetro primordial en los nuevos diseños. En esta etapa se debe obtener toda la información posible en cuanto al funcionamiento del producto, saber si se satisfizo totalmente la necesidad, así como saber si el material falló y bajo que condiciones falló.

El uso del diseño por el consumidor es muy importante, el saber como el consumidor reacciona con el producto se repercute en todo el proceso de diseño, unos parámetros útiles para identificar al producto con respecto al usuario son conocer si el producto tiene un fácil mantenimiento, es un producto seguro, tiene apariencia estética, fácil de operar, etc.

El proceso de diseño descrito anteriormente se puede comparar con el método científico ya que todos sus pasos son muy similares, tal y como se muestra en la figura 2.1.

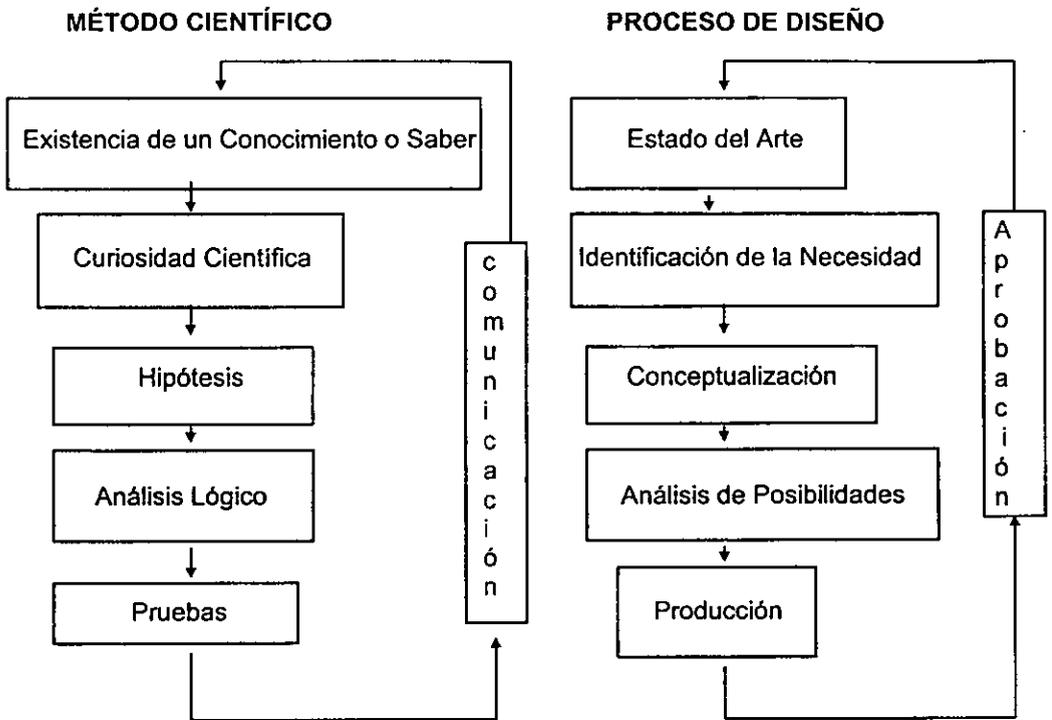


Figura 2.1. Comparación entre el Método Científico y el Proceso de Diseño.

El método científico empieza con la existencia de un conocimiento o saber. El científico tiene curiosidad de ciertas preguntas y con esto formula una hipótesis. La hipótesis es sometida a un análisis lógico que la confirma o la niega. Algunas veces el análisis revela inconsistencias con lo que la hipótesis tiene que ser cambiada en un proceso iterativo. Finalmente, cuando la nueva idea es comprobada se acepta como prueba por los científicos.

El proceso de diseño es muy similar al método científico. El proceso de diseño empieza con el estado del arte, después existe una curiosidad científica que realmente viene a dar con la identificación de la necesidad. Cuando la necesidad es identificada

se debe conceptualizar en algún tipo de modelo, el modelo debe someterse a un análisis de posibilidades hasta que sea aceptado. Cuando el diseñador entra a la fase de producción el diseño compete en un mundo de tecnología y el ciclo de diseño acaba cuando el producto es aceptado.

En estos tiempos actuales aparte de tener ciertas actividades tradicionales del diseño debemos tener en cuenta que con el gran avance tecnológico del mundo debemos considerar nuevos factores tales como:

- Seguridad contra la falla
- Ecología
- Impacto Sociológico
- Conservación Técnica
- Estética
- Sistema de Unidades
- Calidad
- Prototipos Rápidos
- Ingeniería Concurrente

⇒ *SEGURIDAD CONTRA LA FALLA*

La seguridad de un diseño es un aspecto que los ingenieros han tenido siempre en mente, pero que ahora requiere mayor atención. Esto se lleva a cabo mediante la unión de los hechos o factores importantes que intervienen en el diseño y de esta manera llegar a una buena decisión que refleje seguridad, conocimiento, imaginación, ingenio y criterio.

El paso más importante en cuanto a seguridad es él poder percibir el riesgo o la importancia del suceso si llegase a fallar este paso es sumamente importante, por ejemplo que pasaría si los automóviles no tuvieran cinturones de seguridad; la persona que condujera el automóvil y tuviera un accidente al impactarse contra otro objeto al no usar el cinturón de seguridad el automóvil se detendría con el objeto pero la persona dentro del automóvil podría tener diversas situaciones por mencionar algunas:

1. - El conductor se detendría con el volante.
2. - El conductor podría salir disparado por el parabrisas.
3. - El conductor podría impactarse en otro lugar dentro del automóvil.
4. - Una situación inesperada.

Al diseñarse el automóvil se acondicionó con cinturones de seguridad para que el conductor tuviera mayor seguridad al viajar dentro del automóvil. Por ejemplo en la industria de la aviación el factor de seguridad es muy alto debido al riesgo que implicaría que alguna parte del avión fallará. La seguridad es un punto relativo, y debe tomarse en cuenta un ajuste equilibrado entre la seguridad, costo, estética, etc. El ingeniero debe percibir situaciones secundarias si el diseño llegará a fallar, por ejemplo una esmeriladora manual si se llegará a romper el maneral no solo no se podría usar, si no que en el momento del accidente si ésta se encuentra trabajando podría cortar una mano o impactarse contra cualquier objeto, de hecho se debe de pensar en efectos secundarios que podría causar un mal diseño ya que algunas veces estos efectos pueden ser más peligrosos que la misma falla de ahí la gran importancia de una correcta selección de materiales. Otro aspecto importante es que el diseño cumpla con las normas nacionales e internacionales en caso de

necesidad para tener el respaldo de que cumple con las especificaciones técnicas y legales necesarias.

Cuando uno diseña un aparato o máquina este debe tener sus instrumentos y controles adecuados al tipo de persona que lo va a manejar, por ejemplo podrían diseñarse abrelatas para zurdos y para derechos; el volante de un automóvil tiene cierto tamaño si se le cambia el volante por uno más pequeño aumentará el trabajo para dar la vuelta, este ejemplo nos da una idea más clara de por que las cosas se diseñan de cierta manera. Cómo estos y otros ejemplos se podrían mencionar pero lo importante es tener en cuenta ¿quien? es la o las personas que van a utilizar el aparato o máquina y cual es el mejor material a utilizar para evitar la falla.

Cabe mencionar que dentro de este aspecto es importante el concepto de ergonomía con lo que al utilizar dicho concepto tenemos una mayor comodidad en cuanto a la utilización del aparato o máquina.

⇒ *ECOLOGÍA*

La ecología es un factor en donde se deben considerar que tipos de materiales se van a utilizar en el diseño de preferencia utilizar un material que se recicle rápidamente y de forma barata y de preferencia sin causar contaminación en el medio ambiente.

⇒ *IMPACTO SOCIOLÓGICO*

Debemos considerar el impacto sociológico que nuestro diseño va a reflejar si va a incrementar la seguridad, un mejor ambiente y va a lograr una vida más cómoda.

⇒ *CONSERVACIÓN TÉCNICA*

La conservación técnica la podemos ejemplificar con las computadoras; a una computadora pentium le podemos aumentar la velocidad de procesamiento con hacer un cambio en el coprocesador matemático conservando toda la tarjeta maestra.

⇒ *ESTÉTICA*

El diseño debe tener una forma, textura y color adecuados a la gente que lo va a utilizar que todo el diseño tenga un balance y unidad simultánea.

⇒ *SISTEMA DE UNIDADES*

Aquí simplemente se debe de optar por manejar el Sistema Internacional de Unidades debido a que este Sistema se internacionalizó hace algunos años y en un futuro no muy lejano todos debemos usar este Sistema.

⇒ *CALIDAD*

La calidad actualmente en los diseños no solo se define como una cualidad del diseño en cuanto a que tenga buen acabado, durabilidad y otras propiedades sino que debe de cumplir además con ciertas normas internacionales como son la NOM, ISO, SAE, QS, u otras normas dependiendo el tipo de producto en cuestión. Para medir la calidad de un producto también nos podemos apoyar en el Control Estadístico de Proceso el cual es una herramienta que nos sirve para certificar las normas actuales de calidad.

⇒ *PROTOTIPOS RÁPIDOS*

En cualquier diseño es conveniente realizar un modelo a escala para tener una mejor percepción del mismo diseño y poder colaborar a posibles mejoras, estos modelos

anteriormente se elaboraban de madera, cera u otros materiales, actualmente existen técnicas como las de estereolitografía y otras con las cuales podemos crear un prototipo rápido el cual es un modelo a escala o del tamaño real pero elaborado rápidamente y diferente al material del diseño final este material por lo general suele ser un polímero con resina.

⇒ *INGENIERÍA CONCURRENTE*

El concepto de ingeniería concurrente básicamente se basa en que la elaboración de un diseño se lleva simultáneamente y no por pasos como en el diseño normal, sino que desde la concepción del propio diseño se comunican e interactúan entre sí los departamentos de manufactura, ensamble, ventas, empaque, distribución y otros en el cual existe un coordinador de diseño ó un equipo de diseñadores que son los que se intercambian toda la información.

El concepto de Ingeniería Concurrente se puede visualizar mejor en la Figura 2.2, en dicha figura, se observa que el coordinador de diseño tiene comunicación con todos los departamentos y los departamentos entre ellos mismos tienen una comunicación bidireccional. En este procedimiento de diseño, un diseño conceptual es presentado en forma simultánea a cada uno de los departamentos, los cuales pueden comentar el diseño en relación a su área. Así, por ejemplo, los diseñadores de ensamble consideran problemas en el ensamblado, los diseñadores de manufactura consideran las máquinas y herramientas disponibles y simultáneamente los otros departamentos también consideran los problemas respectivos a cada departamento y si algún departamento de estos tiene problemas lo comunica inmediatamente a los demás o al coordinador de diseño, con la ventaja de que la comunicación es más

constante y si el diseño llega a sufrir algún cambio inmediatamente se enteran todos los departamentos.

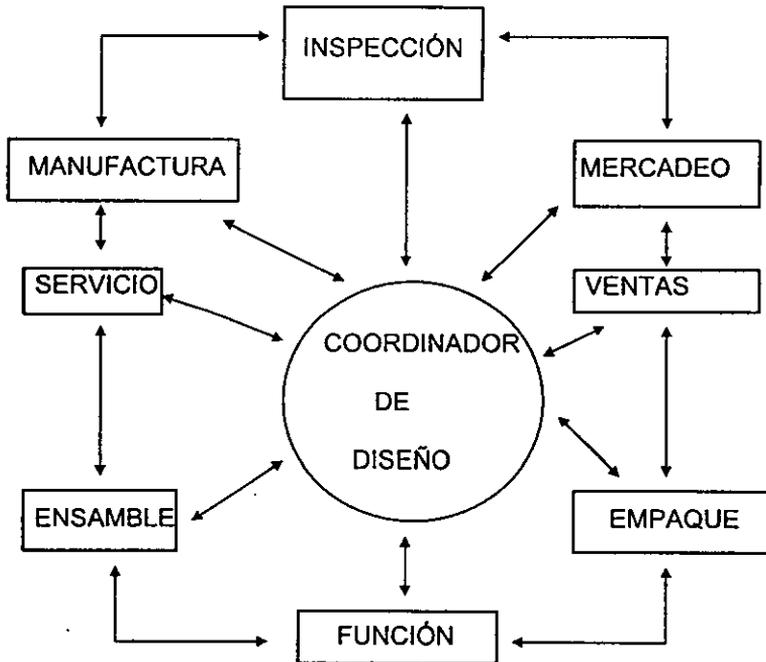


Figura 2.2. El concepto de Ingeniería Concurrente.

La Ingeniería Concurrente detalla el diseño mientras simultáneamente se desarrolla la conceptualización, fabricación y la calidad. La esencia de la Ingeniería Concurrente es la integración del diseño del producto y de la planeación del proceso dentro de una actividad en común.

Para tener un buen manejo de la Ingeniería Concurrente debemos contar con un sistema de CAD / CAM / CAE. Algunos de los sistemas de CAD pueden ser CADkey, AutoCAD, los cuales nos sirven para hacer un modelado geométrico de la pieza o las piezas en cuestión, además de que al irse introduciendo cambios en el diseño las piezas van siendo detalladas y dimensionadas de forma automática. Dentro de los sistemas CAM tenemos a ProCAD/CAM, SmartCAM, MasterCAM, estos sistemas lo que hacen es proporcionar un panorama de la trayectoria a seguir por nuestras máquinas de control numérico y el código de control numérico.

Finalmente los sistemas CAE son más extensos por mencionar algunos sería el I/EMS, I/FEM, NISA/DISPLAY etc. los cuales nos sirven para modelado en 3D y análisis de elemento finito. Estos sistemas deben de tener una base de datos común junto con la información de los demás departamentos para poder aplicar correctamente el concepto de Ingeniería Concurrente.

Cabe mencionar que el concepto de Ingeniería Concurrente puede o no hacer uso de estos o más sistemas computacionales dependiendo el tipo de diseño en cuestión con el inconveniente de que muchos de estos sistemas son muy caros y no todas las empresas tienen el capital para poder comprarlos, además de que la Ingeniería Concurrente es un nuevo proceso y no todas las compañías tienen el capital para poder capacitar a su gente y hacer un buen uso del concepto de Ingeniería Concurrente en México.

2.5. – Relación de los materiales en el proceso de diseño.

Nuestra meta es desarrollar una metodología para la selección de materiales para evitar la falla en el diseño mecánico, para lograr esto hay que saber que los

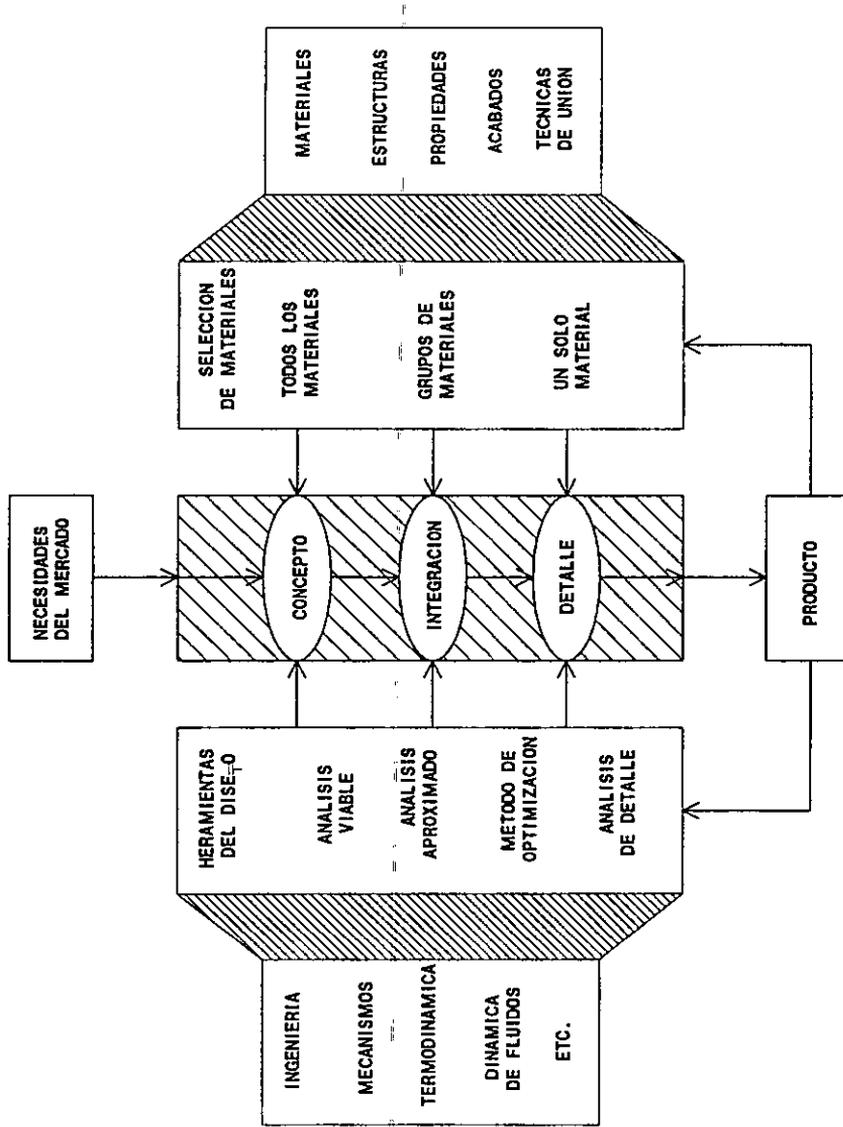
materiales intervienen en todos los tipos de diseño e influyen en gran parte en el proceso de diseño.

Hemos visto que existen 3 tipos de diseño en cada uno se encuentra presente la selección de materiales, en un diseño original los nuevos materiales pueden ofrecer una nueva y única combinación de propiedades las cuales permiten que un diseño sea original, así la alta pureza del Silice permitió que se diseñara el transistor, de las aleaciones de los metales surgió la turbina de gas. Muchas veces el proceso de un diseño adaptativo es posible gracias al desarrollo de los materiales, los polímeros reemplazaron a los metales en aparatos domésticos, la fibra de carbono reemplazó la madera en artículos deportivos. En el diseño de variantes generalmente se busca un cambio de escala con lo cual se requiere un cambio de material para evitar la falla.

Algunas veces de un nuevo material se sugiere un producto nuevo, pero también un nuevo producto demanda el desarrollo de un nuevo material.

Un buen diseño se logra cuando se utilizan las "herramientas del diseño" las cuales nos permiten tener la base para poder desarrollar con éxito un diseño. Estas herramientas se pueden visualizar en el diagrama mostrado en la figura 2.3. para su mejor comprensión.

FIGURA. 2.3. DIAGRAMA DE FLUJO DE DISEÑO QUE MUESTRA LAS HERRAMIENTAS DEL DISEÑO Y LOS MATERIALES.



NOTA: Recordando el proceso de diseño, en la parte de diseño conceptual se menciona que se divide en dos etapas, la primera nos ayudaba a entender y definir el problema, la segunda a generar las alternativas de solución y generar conceptos, en el diagrama se mencionan estas dos etapas con diferente nombre la primera como concepto y la segunda como integración, pero las dos pertenecen a la fase de diseño conceptual.

En la parte izquierda están las herramientas de ciencia e ingeniería las cuales nos permiten el análisis, modelado y optimización del diseño, en ellas están las ecuaciones y principios de la mecánica, termodinámica, dinámica de fluidos, métodos numéricos, técnicas de modelado, etc. Hay una progresión natural en el uso de estas herramientas al desarrollar el proceso de diseño, en el concepto existe una aproximación al análisis y al modelado, un modelado más sofisticado y una optimización envuelve a la integración y un detallado análisis en el diseño de detalle.

La selección de materiales entra en cada etapa de proceso de diseño como se ve en la parte derecha de la figura con la finalidad de evitar la falla. Se ha encontrado que cada paso involucra una selección, llegando como resultado a la optimización en costo y funcionalidad del producto.

En la etapa del concepto el diseñador requiere una información lo más amplia posible en cuanto a materiales. Todas las opciones están abiertas, un polímero puede ser la mejor opción para un concepto, un metal para otro aunque la función sea la misma. El problema en este estado no es la precisión sino que la información sea amplia y accesible.

En la integración el diseñador necesita una información sobre los materiales escogidos con un nivel más preciso y detallado. En una lista se deben escribir y comparar las propiedades de una sola clase de materiales, por ejemplo metales, y permitir la selección a un nivel más fácil que si se tienen todos los materiales juntos.

En el diseño de detalle se necesita tener la mejor información, con todos sus detalles pero solo para uno o muy pocos materiales, en esta etapa el proveedor debe de ser identificado ya que las propiedades de su producto van a ser utilizadas en los cálculos de diseño y que con otro proveedor puede ser diferente.

La selección de materiales no puede ser separada de la selección de la forma, llamando forma a la configuración externa (macro), y cuando es necesario la forma interna, la microestructura del material.

En la fabricación, el material es sometido a un proceso donde el proceso está influenciado por las propiedades del material: maquinabilidad, soldabilidad, tratamientos térmicos, etc. De aquí se puede percibir la importancia de la selección de los materiales para una buena producción y así poder evitar la falla.

La entrada de información de los materiales no termina con el establecimiento de la producción, un diseñador es imprudente cuando no obtiene y analiza la información de las fallas en servicio, por lo cual se ve que los materiales influyen también en la última etapa del diseño y nuestro objetivo es precisamente evitar una nueva selección de materiales.

2.6.- Conclusiones.

El diseñar es un proceso iterativo en el cual el punto de partida es una necesidad de mercado, primero se procede a conceptualizar el diseño es donde resultan los bosquejos del modelo a desarrollar y se analiza superficialmente el modelo para ver si es viable su desarrollo, luego se procede a todo un análisis de posibilidades para lo cual se desarrolla un análisis más profundo en donde permiten saber las dimensiones, estimar funcionalidad y costo, y si el resultado es satisfactorio se procede al diseño de detalle donde surge un análisis completo de los componentes, preparación de los planos de fabricación, tolerancias, acabados, tratamientos y otras continuando con la producción del producto, y finalmente obtener la información en cuanto al servicio del producto.

En todo el proceso de diseño un ingrediente fundamental son los materiales los cuales entran en todas las etapas del diseño pero en diferentes niveles de extensión y precisión, en la primera etapa entran las cuatro grandes categorías de materiales que son los: metales, polímeros, cerámicos y materiales compuestos, al irse desarrollando cada etapa del proceso se van a ir eliminando muchas clases de materiales y al finalizar en el diseño de detalle se debe de tener uno o muy pocos materiales para la producción del diseño y así evitar la falla.

Es importante saber que con el gran avance tecnológico de la humanidad debemos constantemente actualizarnos respecto a los materiales, ya que el uso de un nuevo material puede significar una mejora o un nuevo diseño. Así como saber que la interacción entre la función, material, forma y proceso conduce al corazón del proceso de selección de materiales. Además de que en la actualidad se requiere que los diseños aparte de funcionales sean cada día más seguros, para evitar la falla. De ahí la importancia de que en el siguiente capítulo hablemos de la selección de materiales, para poder evitar la falla.

CAPITULO 3

LA SELECCIÓN DE MATERIALES

3.1. – Introducción.

La selección de materiales en si, es un proceso bastante complicado debido a la extensa gama de materiales que actualmente existen, aproximadamente alrededor de 40,000 materiales y aleaciones, a los cuales hay que agregar todos los nuevos compuestos plásticos y cerámicos que se generan día con día.

Asimismo debemos considerar otros factores que influyen notablemente en la selección para que esta sea la más adecuada, nos referimos a las propiedades de cada material, a los cambios físicos a los que será sometido el material y a los procesos que puedan afectar su composición química.

Debemos tomar en cuenta desde un principio estos factores ya que es muy común que se crea que se ha seleccionado el material adecuado y en la mitad del proceso de manufactura se dañe el material terminando en la basura con el costo de la mano de obra ya incluida y es que hay que comprender que en muchos procesos de manufactura la materia prima representa a veces más del 50% del costo total del producto.

Por generaciones siempre se ha recurrido a manuales y folletos que proporcionan los distribuidores o fabricantes de materiales, sin embargo esto no es suficiente cuando tenemos la necesidad de seleccionar un material para una aplicación específica, podemos hacer uso de programas de computadora que no siempre están a la mano, y que decir si es necesario una investigación más científica, algo más especial o sofisticado, para esto simplemente no tenemos la

información.

En las páginas siguientes se analizarán los métodos, el proceso, y los criterios necesarios que nos darán la pauta para crear una herramienta lo suficientemente útil para la correcta selección de los materiales y evitar la falla.

3.2. – Materiales y sus propiedades

En un principio explicaremos brevemente como están agrupados en familias los materiales y sus propiedades.

Los materiales se agrupan en familias y las más comunes en la industria moderna son:

Metales, Cerámicos y Orgánicos, dentro de los orgánicos se incluyen a las subfamilias de los plásticos, la del caucho y de la madera, y muy recientemente la familia de los materiales compuestos.

Un material generalmente lo identificamos por sus propiedades y estas pueden ser:

Físicas, Mecánicas, Térmicas, Eléctricas y Químicas.

Estas propiedades nos indican la estructura, la composición, funcionalidad y confiabilidad del material.

Pero la estructura del material podemos modificarla a través de aleaciones con otros materiales o por medio de cambios de temperatura o procesos de transformación, cambios que los materiales deben de soportar para utilizarlos en diferentes situaciones o determinadas necesidades.

Como ya se había mencionado, las propiedades de los materiales son bastante extensas sin embargo estas se pueden estudiar a través de dos tipos de especificaciones:

-Especificaciones de funcionamiento

-Especificaciones del producto

En el primer tipo de especificaciones nos basamos en las necesidades del proyecto a desarrollarse, características del producto y funcionamiento del producto, Ej. aceros para herramienta.

En las especificaciones de producto definimos los componentes de los diseños que son comprados o manufacturados, Ej. Aceros laminados en frío.

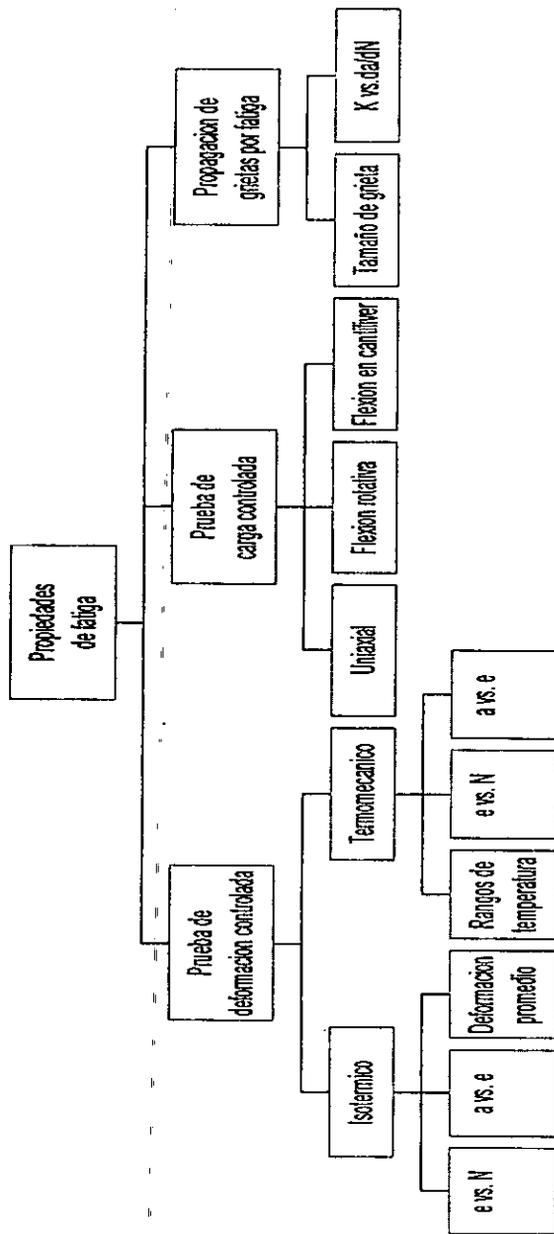
Ahora se muestra la Tabla 3.1. con las propiedades más importantes que afectan directamente a cualquier material y que son básicas para poder especificar algún producto y al mismo tiempo evaluarlo para poder prevenir la falla.

PROP. FISICAS	PROP. MECANICAS	PROP. TERMICAS	PROP. QUIMICAS	PROP. NUCLEARES	PROP. DE FABRICACION	PROP. ELECTRICAS
DENSIDAD	DUREZA	CONDUCTIVIDAD	OXIDACION	MEDIA VIDA	DURABILIDAD	CONDUCTIVIDAD
TEMP. DE FUSION	MODULOS DE ELASTICIDAD	CALOR ESPECIFICO	CORROSION Y DEGRADACION	ESTABILIDAD	TRATAMIENTO TERMICO	CONSTANTE DIELECTRICA
PRESION DE VAPOR	RESISTENCIA A LA FATIGA	COEFICIENTE DE EXPANSION	CORROSION POR FATIGA		FACILIDAD DE FUNDICION	
VISCOSIDAD	RESISTENCIA A LA TRACCION	RESISTENCIA AL FUEGO	ESTABILIDAD TERMICA		FACILIDAD PARA DOBLAR	
POROSIDAD	RESISTENCIA ULTIMA				FACILIDAD PARA MAQUINAR	
PERMEABILIDAD	PROP A LA FATIGA				FACILIDAD PARA SOLDAR	
REFLECTIVIDAD	TENACIDAD A LA FRACTURA					
PROP. OPTICAS	ALTA RESISTENCIA A LA TEMPERATURA					
	PROPIEDADES DE DESGASTE					

TABLA 3.1- LISTA DE PROPIEDADES BASICAS QUE AFECTAN CUALQUIER MATERIAL

Muchas propiedades, si no es que casi todas las propiedades antes mencionadas pueden considerarse con ciertos cambios cuando se ven afectadas por algún otro factor externo como puede ser fatiga o medio ambiente, como la tabla 3.2. que muestra las pruebas a las que son sometidos los materiales para determinar sus propiedades bajo cargas variables (fatiga).

TABLA 3.2.-EXPANSIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FATIGA



3.3. – Proceso para la selección de materiales.

En este subtema se describen en forma general el proceso para la selección de materiales, el cual es fundamental para evitar que el material y el diseño estén expuestos a que comiencen a fallar, la gran variedad de materiales nos obliga a seguir un método perfectamente bien definido y es que cuando nos enfrentamos al problema de seleccionar un material debemos primero comprender cual va a ser el significado de nuestra selección, debemos preguntarnos en primera instancia si el material que analizamos lo utilizaremos para un nuevo diseño o producto o en caso contrario si se usará en mejorar algún diseño existente, tomando en consideración la reducción de costos, mejoras en su funcionamiento o en el aspecto de seguridad por mencionar algunos.

Sin embargo casi siempre que optamos por cambiar el material para mejorar el diseño, nos comprometemos a cambiar el diseño mismo, ya que así podemos explotar totalmente el potencial de ese nuevo material y al hablar de cambiar el diseño también nos referimos a cambiar por ende el proceso de manufactura. Un ejemplo clásico es la comparación existente en el proceso de vaciado a un molde de una aleación, por decir algo, base zinc por este mismo moldeo pero ahora por inyección y con un material más noble como puede ser un polímero el cual es más económico, o sea que, no solo cambiamos el material sino también el proceso.

Los pasos en el proceso de selección de materiales se pueden definir de la siguiente manera:

1). -Análisis de requerimientos de materiales

En este punto debemos de determinar las condiciones bajo las cuales va a

trabajar el material, si va a estar sometido a las inclemencias del tiempo o si existe alguna condición extraordinaria que pudiera afectar su funcionamiento. Asimismo analizamos las propiedades críticas con las cuales trabajará el material.

2). -Comparación de todos los materiales que pudieran ser seleccionados como efectivos

A través de una extensa base de datos, la cual contiene las propiedades necesarias de cada material, obtenemos una lista preliminar de materiales que cubren los requerimientos obtenidos en el punto anterior.

3). -Selección de materiales que pueden ser candidatos.

En base a conceptos tales como; Fácil comercialización, bajo costo, fácil de fabricar, etc. y otros índices se seleccionan los materiales de la lista preliminar.

4). -Desarrollo de datos de diseño

Después del punto anterior y tener una lista más reducida de materiales, determinamos experimentalmente todas las propiedades de los materiales restantes para obtener cifras confiables por medio de estadísticas y conocer el desempeño del material que se supone se encontrará cuando esté en servicio.

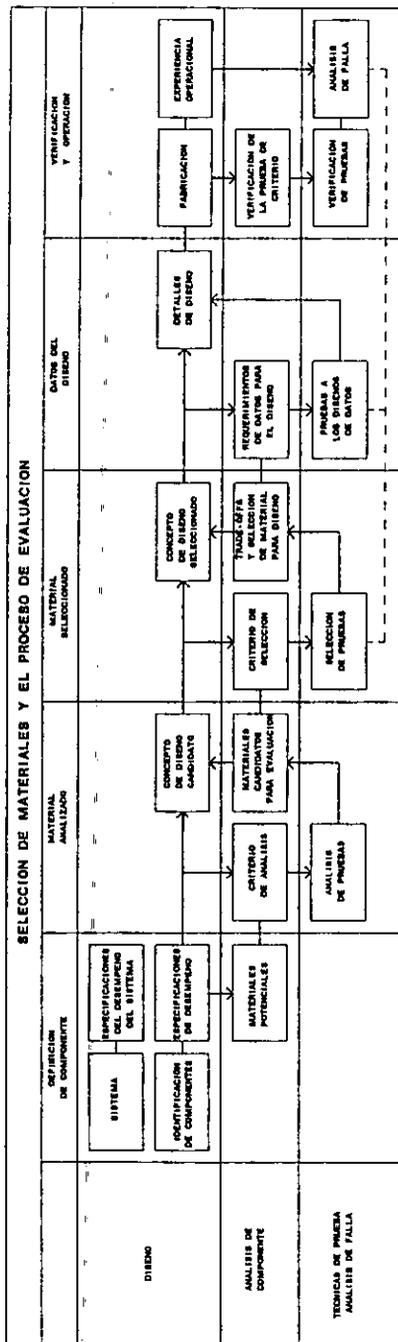
Ahora bien, en este proceso de selección del material adecuado a nuestras necesidades, existen fases inherentes a los pasos del proceso detallados anteriormente, una de ellas es la propiedad que tiene el material para que pueda ser filtrado, ya que todo material tiene un punto mínimo y un punto máximo de operación sin que se afecten sus características principales, la idea en esta fase es que no se rebasen estos límites, porque si esto ocurre entonces debemos decidir si este material lo analizamos para otra aplicación o si continuamos el proceso de selección pensando que en la selección final se involucran más

propiedades, su costo o su fabricación y pueda compensar positivamente el primer juicio que hemos hecho de este material.

Otra propiedad que tienen los materiales es la de los datos de diseño, porque en muchas ocasiones los proyectos no necesitan un examen tan severo o estricto y los datos obtenidos pueden cubrir perfectamente las recomendaciones que marcan los reglamentos o códigos existentes como pueden ser el ANSI o ASTM a menos que industrias tan sofisticadas como la aeroespacial o nuclear las cuales manejan parámetros más precisos y exigentes, los cuales son entendibles por la naturaleza de su giro ya que además de ser más delicados en sus procesos, generan pruebas más extensivas que dejen a los Ingenieros con la suficiente confianza para usar el material seleccionado.

A manera de ejemplo en la tabla 3.3. se muestra la selección de materiales y el proceso de evaluación de un proyecto complejo.

TABLA 3.3.- PROCESO DE SELECCION Y EVALUACION DE MATERIALES



Todos sabemos de la importancia que tiene que un proceso de manufactura o un método de fabricación sean lo más económicos posibles, el costo juega un importante papel para lograr este objetivo y lógicamente los materiales también se ven afectados por este concepto, deben ser baratos y nunca debemos de dejar descuidado este punto para una correcta selección del material, el costo básico de un material depende en primer lugar de la escasez o sea de que tanto material, después de ser seleccionado, se encuentra acaparado por distribuidores o productores, ya que esto genera que el material aumente su valor.

El material también al ser procesado o trabajado antes de manufacturarse, hablando específicamente del proceso consume cierta cantidad de energía que debe agregarse al costo del material. Y por último la demanda provoca fenómenos económicos que también hacen variar el precio final del material.

Podemos tomar como ejemplo la piedra o el cemento, materiales que se encuentran en forma abundante en la tierra y que su precio es relativamente bajo, mientras que materiales escasos como el diamante o el oro los cuales tienen un precio considerablemente más alto.

También se deben de considerar además de los costos extras explicados anteriormente los que se enumeran a continuación y que de alguna manera afectan el precio final de los materiales.

-Requerimientos metalúrgicos

Si algún material como los metales requieren de una dureza extra, la propiedad del material se modifica al procesar el metal a través de rodillos a alta

temperatura, este proceso se denomina laminado en caliente.

Así como alguna prueba física o química que se le practique al material.

-Dimensiones

El manejo especial de tolerancias, anchos o longitudes.

Cortes y afilados del material.

-Procesamientos

Ya sean de carácter superficial o térmico

-Cantidad

Muchos proveedores acostumbran descuentos o rebajas en grandes volúmenes.

-Empaque y embarque

Se considera también como se enviará el material depende de la distancia o el medio a utilizar para enviar el material ya sea en barco, avión, camión etc.

Tal y como se apunta es muy frecuente que todos estos costos no se identifiquen de primera instancia pero al final influyen notablemente en el precio final del producto.

3.4. – Los criterios en la selección de materiales.

Se debe estar conciente que el proceso de selección de materiales se ha desarrollado con el paso del tiempo a través de pruebas de acierto y error. Actualmente no tenemos una metodología precisa en la cual podamos confiar y donde el propósito de nuestro trabajo es precisamente el elaborar una metodología fácil y práctica en la cual podamos establecer parámetros más precisos y útiles. Existen criterios muy importantes que se han clasificado de la siguiente manera:

1. -Índice de costo contra rendimiento
2. -Índice de ponderación de propiedades
3. -Análisis del valor o valuación
4. -Análisis costo - beneficio
5. -Análisis de falla

Como se ha anotado con anterioridad los costos de los materiales son y deben ser los principios del proceso en la selección de materiales por considerarse el parámetro más importante en la reducción de precio de un proyecto.

Es muy común que nos encontremos con el problema de que un material cubra o satisfaga uno, dos o más requerimientos de funcionamiento, este problema lo podemos resolver a través de tablas o matrices que enlistan una serie de requerimientos de funcionamiento los cuales son clasificados de acuerdo a su importancia dándoseles un valor o peso a cada requerimiento y el más importante o de mayor peso es el que resulta seleccionado.

También debemos considerar cuando un diseño se considera complejo una serie de factores que pueden convertirse en riesgosos en el momento de crear el programa de manufactura, estos factores son:

- Horario programado
- Costo
- Facilidad para manufacturarse
- Rendimiento
- Mantenimiento
- Posibilidad de reparación

-Durabilidad

A continuación analizaremos los criterios de selección de materiales mencionados anteriormente.

1). - Índice de costo contra rendimiento

La relación costo-rendimiento es un criterio que usaremos como parámetro para poder optimizar la selección del material tomando como siempre en consideración la importancia que tiene el costo como uno de los factores más importantes que llegan incluso a controlar el desarrollo del proyecto.

Debemos tomar en cuenta un principio que está equivocado y que debemos de cambiar, ya que frecuentemente se cree que el criterio de que el costo de los materiales es el de dinero por el peso del mismo material, cuando en realidad lo más correcto es que el costo se mida en dinero por volumen del mismo material, tal es el caso de los plásticos que se miden en unidades de volumen, en lugar de unidad de peso.

Por otro lado el costo del material debemos considerarlo de la siguiente manera; al costo inicial del material hay que agregarle el costo de manufactura e instalación, y por último sumarle el costo de operación y mantenimiento, a este procedimiento lo llamaremos costo total del ciclo de vida del material.

De las partes del costo total del ciclo de vida del material, este costo se incrementa considerablemente en el punto de manufactura donde el fabricante se enfrenta a un mayor número de dificultades. Sin embargo el número de pasos en el proceso o el valor que cada una de ellas puede tomar, puede decrecer, lo cual beneficiaría en el costo final del material ya que su vida útil crecería. Esto se puede apreciar más claramente en la gráfica mostrada en la figura 3.4., en ella el

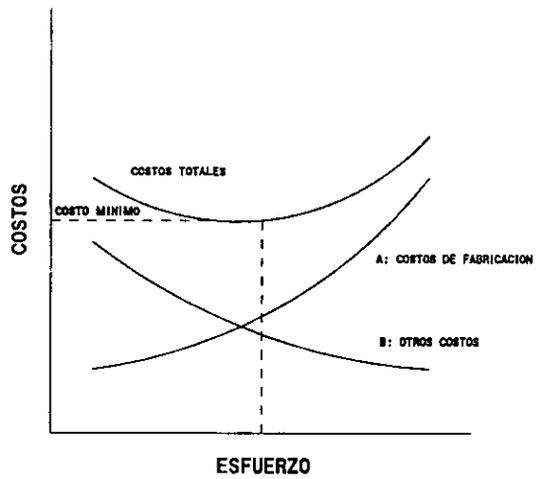


FIGURA 3.4. - RELACION ENTRE EL COSTO Y UNA PROPIEDAD DEL MATERIAL

costo total es la suma de A y B y en ella el valor óptimo ocurre con el costo mínimo.

Siempre hay que recordar que el costo del material está íntimamente relacionado con el peso o volumen del material, y la gran mayoría de los problemas o de manera común giran en torno a la cuestión del peso de cada uno de los materiales, su resistencia y su rigidez.

Como ejemplo tomaremos el caso más simple de deformación de una barra en tensión uniaxial donde el esfuerzo de trabajo es igual a:

$$\sigma_w = \text{Fuerza axial} / \text{área transversal} = P / A$$

Si la sección transversal y las propiedades del material de 2 barras A y B son denotadas por " A " y " σ " respectivamente, la condición de igual resistencia en ambas barras está dada por:

$$F = \sigma_a A_a = \sigma_b A_b \quad \text{sustituyendo el área}$$

$$F = \sigma_a D_a^2 = \sigma_b D_b^2 \quad \text{por lo tanto } D_b/D_a = (\sigma_a / \sigma_b)^{1/2}$$

$$\text{Pero si el peso de la barra es: } W = \rho v = \rho A L = \rho (\pi D^2 / 4) L$$

$$\text{Entonces } W_b / W_a = (\rho_b D_b^2 / \rho_a D_a^2) = \rho_b \sigma_a / \rho_a \sigma_b$$

Si el costo del material " A " es " M_a " \$ / Kg. Y el costo del material " B " es " M_b " \$ / kg. Entonces el costo de la barra hecha del material " B " para soportar la carga " P " es:

$$C_b = W_b M_b \quad \text{y} \quad C_a = W_a M_a$$

Así que sustituyendo

$$C_b / C_a = (\sigma_a \rho_b M_b) / (\sigma_b \rho_a M_a)$$

El costo por unidad de resistencia es $C = \rho m / \sigma$, en este ejemplo usamos

la resistencia a la deformación, pero en otras situaciones puede ser la resistencia a la flexión, resistencia a la fatiga o resistencia a la ruptura.

La relación para la estructura equivalente para igual rigidez, considera una viga de longitud "L" en cantiliver con un extremo libre. La deflexión en el extremo libre esta dada por $\gamma = (P L^3) / (3 E I)$

Donde "E" es el modulo de elasticidad e "I" el momento de inercia de la sección transversal de la viga.

La condición de igual rigidez en dos vigas de material "A" y "B" esta dada por:

$$E_a I_a = E_b I_b$$

Si consideramos una viga con sección transversal rectangular entonces:

$$I = (w h^3) / 12$$

Donde w = ancho y h = espesor

Con ancho y longitud constante el espesor de material es:

$$- h_b = h_a (E_a / E_b)^{1/2}$$

Y el costo relativo esta dado por

$$- C_b / C_a = (E_a / E_b)^2 (\rho_b m_b / \rho_a m_a)$$

Existen muchos índices que en capítulos posteriores serán mencionados

2). -Índice de ponderación de propiedades

Frecuentemente nos encontramos con el problema de que un material debe cumplir con dos o más requerimientos, a cada uno de ellos se les da un valor o cierto "peso" y el que mayor peso tenga será el material al que mayor importancia se le debe de dar y sobre todo el que mejor rendimiento va a tener.

El primer paso que se debe de dar para desarrollar este índice consiste en hacer una lista de las propiedades que en mayor o menor grado interactúan con el producto incluyendo los costos que se consideran como de vital importancia o de gran peso.

Después se indica cuales de ellas son críticas y cuales relativas, donde las críticas son las que no pueden dejar de cumplirse y relativas las que pueden ser cubiertas por los materiales considerados inicialmente.

Posteriormente se hace una búsqueda intensa de propiedades en libros, manuales o folletos especializados, para que después con toda esta fuente de información se conforme una lista de materiales candidatos, los cuales se suponen cumplirán los requisitos determinados inicialmente.

El índice de la propiedad del peso lo calcularemos al multiplicar el valor de la propiedad por el factor de peso, donde cada valor de la propiedad puede tener cualquier valor siempre y cuando no exceda los 100 puntos.

β = propiedad de escala

$\beta = (\text{valor numérico de la propiedad} / \text{valor más grande bajo consideración}) \times 100$

para las propiedades en las cuales es más deseable tener valores bajos como la densidad, costo, corrosión o resistencia eléctrica, el factor se formula así:

β = propiedad de escala

$\beta = (\text{valor más pequeño bajo consideración} / \text{valor numérico de la propiedad}) \times 100$

para las propiedades que no pueden ser expresadas con valores numéricos ej.

Facilidad para soldar y resistencia al agua se utiliza una sencilla clasificación particular como la siguiente.

Figura 3.5.- Tabla de propiedades de un material calificado con valores numéricos subjetivos

Propiedad	A	B	C	D
Facilidad para soldar	EXCELENTE	BUENO	BUENO	REPROBADO
Calificación relativa	5	3	3	1
Variable de escala	100	60	60	20

El índice de rendimiento de material es:

$$- \delta R = \sum \beta_i w_i$$

donde \sum es la suma de todas las propiedades

el costo también se puede considerar como una propiedad

$$\delta' = \delta / m \rho$$

donde m = costo de materiales, ρ = densidad

El material con valores mayor de " δ " será el material apropiado en la aplicación estudiada.

3). - Análisis del valor o valuación

Cuando mencionamos un análisis de valor o valor de ingeniería nos referimos a un sistema de técnicas para identificar y eliminar costos innecesarios sin comprometer de alguna manera la calidad y efectividad del diseño.

A pesar que esta técnica usualmente es aplicada a diversos tipos de problemas se aplica básicamente al problema de selección de materiales.

Este tipo de análisis usualmente es desarrollado por un equipo de ingenieros y supervisores que tienen diferentes puntos de vista, generando que el problema se vea de diferentes perspectivas. Sin embargo debido a la importancia del asunto que se analiza, es necesario el soporte y la aprobación de un alto directivo si queremos que el resultado del análisis sea más satisfactorio.

El plan de trabajo del análisis de valor consiste en estructurar una tabla en la que una serie de labores o funciones se desarrollan para estudiarla. Esta tabla considera todos los aspectos importantes necesarios para el análisis de un material así como un registro escrito que muestra los avances en este estudio.

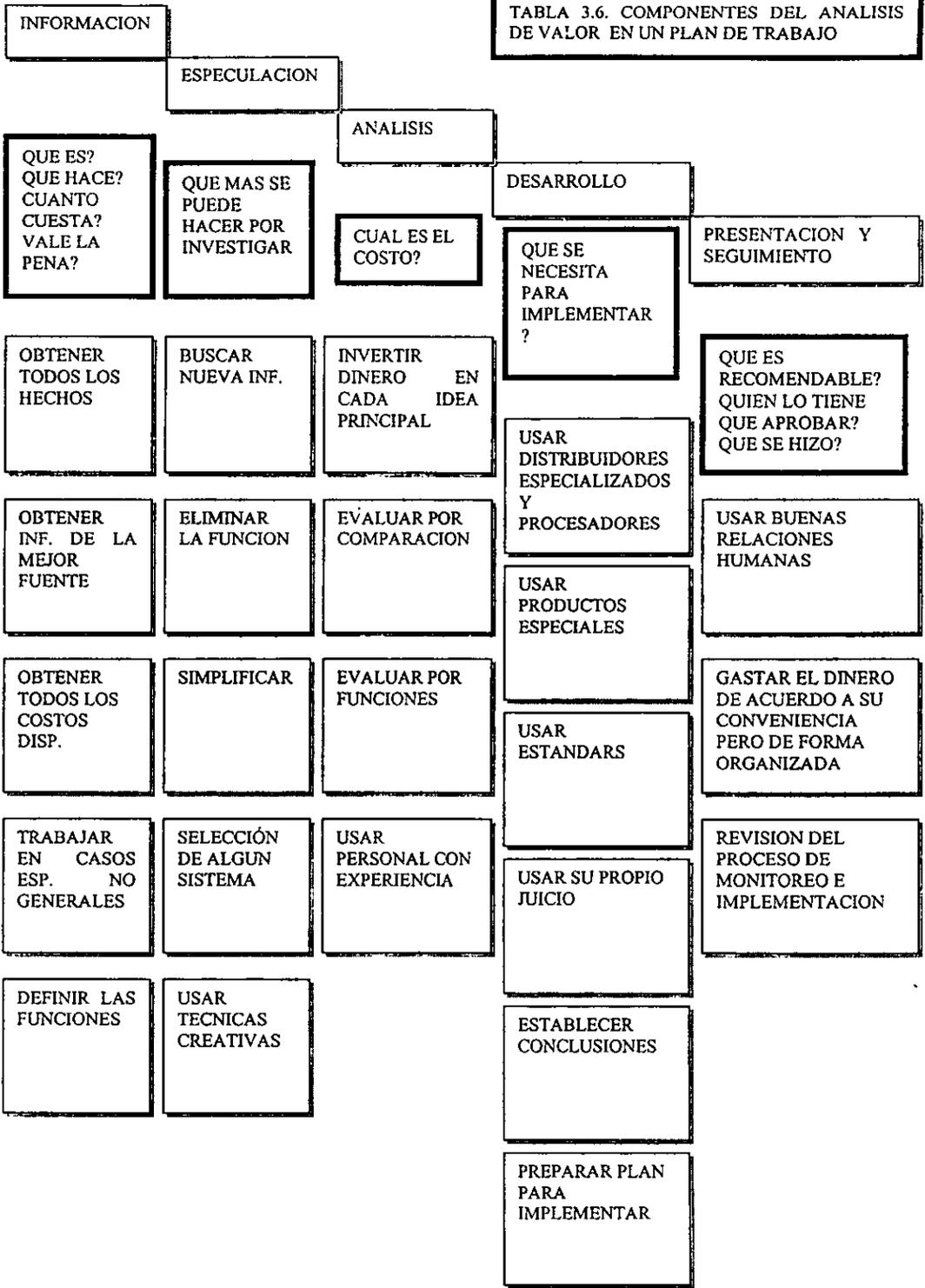
Primero debemos de evaluar la función del diseño o sistema, esta función es por lo general expresada por dos palabras; verbo y nombre, el verbo responde a la pregunta, que hace? Y el nombre responde a la pregunta, que hace que?.

Debemos de establecer perfectamente el problema, la función debe de ser identificada y no limitarnos a unas cuantas respuestas para resolverla.

Este método se ilustra en la tabla de la figura 3.6

Las funciones de un diseño o sistema se deben de dividir en funciones básicas y secundarias. Por ejemplo la función básica de pintar una superficie es protegerla del medio ambiente, la función secundaria es la de darle una buena apariencia. La habilidad de identificar funciones y distinguir entre básicas y secundarias es importante en el análisis de valor. La valoración del diseño solo entra en las funciones básicas y es la parte a la que debemos de darle mayor importancia.

TABLA 3.6. COMPONENTES DEL ANALISIS DE VALOR EN UN PLAN DE TRABAJO



Después de que las funciones han sido establecidas debemos seleccionar la que sea más importante y esto se determina al comparar los diseños a analizar, cuando se hace una mejora al diseño nos referimos al análisis anterior y al presente que se propone para reducir costos o aumentar la calidad y cuando nos referimos a un diseño nuevo se analizan los diseños, y se selecciona el que tenga un costo menor, es importante identificar elementos con alto costo y poner especial atención en ello.

Los pasos en el plan de trabajo para el análisis de valor son tantos como las posibles soluciones del problema, para la tabla anteriormente mencionada tenemos lo siguiente:

I.- Información

se reúne toda la información posible

II.- Especulación

En esta fase se genera por diferentes técnicas (lluvia de ideas, análisis, reportes, gráficos etc.) los significados de las alternativas para realizar las funciones básicas.

III.- Análisis

se involucra otro análisis para compararlo y refinar las alternativas de la fase anterior verificando si tenemos las funciones básicas y su costo preliminar.

IV.- Desarrollo

En esta fase se desarrolla un completo plan de implementación, seleccionándose finalmente junto con otros resultados paralelos.

V.- Presentación y seguimiento

Se presentan los resultados para que algún directivo apruebe las propuestas de

los análisis.

4). -Análisis costo-beneficio.

Dentro de la ingeniería es muy importante decidir sobre la mejor selección del diseño, material o proceso, cuando los recursos económicos son escasos.

Frecuentemente las comparaciones están basadas en un índice de costo beneficio, el cual nos muestra el capital necesario para invertir para producir cierto beneficio deseado.

$$\text{ICB} = \frac{\text{Valor presente o costo anual de todos los beneficios}}{\text{Valor presente o costo anual de todos los costos}}$$

Donde ICB significa Índice de Costo Beneficio.

Un diseño o proyecto en el cual el índice es menor a "1" no siempre es idóneo ya que no se cubre el capital invertido para crear el diseño. Pero generalmente si este índice es mayor a "1" el proyecto es aceptable.

Los factores analizados deben ser los componentes más importantes y con un excelente desempeño. Muy frecuentemente en problemas de selección entre varias alternativas importantes, se deben de comparar beneficios y costos con diseños que pudieran usarse de referencia.

Las alternativas se clasifican respecto al costo, primero cual es la más económica tomándose como referencia inicial, estas se comparan con la siguiente alternativa más alta con relación al costo, que también debe de incrementar en beneficios. Si el índice de costo beneficio es menor a "1", esta segunda opción es

rechazada porque la primera alternativa es mejor.

Ahora se analiza la opción 3 y se compara y si el índice costo beneficio es mayor a "1" entonces esta opción será la mejor selección rechazándose ahora en esta ocasión la primera.

El índice costo beneficio lo podemos usar dentro de un contexto estricto de la ingeniería en la selección de materiales, siendo una práctica herramienta de decisión.

A pesar de que este método es muy usado este tiene problemas, puesto que los costos y beneficios son relativamente independientes, básicamente es un método que no es muy confiable y debe de enriquecerse con los mayores datos posibles.

5). -Análisis de falla

Por lo general las fallas que ocurren en el material son causadas por uno o más de los siguientes conceptos:

1.-Deficiencias en el diseño

a.- el material falla por no considerar las muescas que se crean en la superficie del material

b.- no se conoce en algunas ocasiones las cargas que soporta el material y como se comporta en combinación con el medio ambiente.

c.- dificultad para analizar en forma eficaz la fatiga en zonas con carga aplicada.

2. -Deficiencia en selección de material

a.- desconocimiento total de lo que ocurre en la relación entre condiciones de servicio y criterios de selección.

b.- en muchas ocasiones no existen datos sobre el material

c.- demasiada preocupación al costo del material y no a la calidad de este mismo material.

3. -El daño que sufre el material debido al proceso de manufactura

4. -Sobrecargas y otros abusos al material que afectan el servicio para el cual fue destinado.

5. -Inadecuado mantenimiento preventivo y correctivo

6. -Factores del medio ambiente

a.- condiciones que van mas allá de las permitidas para el diseño

b.- deterioro de las propiedades del material por exceso de tiempo de exposición al medio ambiente.

Sin embargo los materiales usados en Ingeniería fallan más frecuentemente en las siguientes condiciones:

1). - Deformación elástica excesiva

2). - Deformación plástica excesiva

3). - Fractura

4).- Pérdida de propiedades a través de la corrosión ocasionada por el medio ambiente.

Este análisis que es la base de nuestro trabajo será tratado más a fondo y a detalle en el siguiente capítulo.

i

h

g

f

e

d

c

b

a

z

y

x

w

CAPITULO 3

LA SELECCIÓN DE MATERIALES

3.1. – Introducción.

La selección de materiales en si, es un proceso bastante complicado debido a la extensa gama de materiales que actualmente existen, aproximadamente alrededor de 40,000 materiales y aleaciones, a los cuales hay que agregar todos los nuevos compuestos plásticos y cerámicos que se generan día con día.

Asimismo debemos considerar otros factores que influyen notablemente en la selección para que esta sea la más adecuada, nos referimos a las propiedades de cada material, a los cambios físicos a los que será sometido el material y a los procesos que puedan afectar su composición química.

Debemos tomar en cuenta desde un principio estos factores ya que es muy común que se crea que se ha seleccionado el material adecuado y en la mitad del proceso de manufactura se dañe el material terminando en la basura con el costo de la mano de obra ya incluida y es que hay que comprender que en muchos procesos de manufactura la materia prima representa a veces más del 50% del costo total del producto.

Por generaciones siempre se ha recurrido a manuales y folletos que proporcionan los distribuidores o fabricantes de materiales, sin embargo esto no es suficiente cuando tenemos la necesidad de seleccionar un material para una aplicación específica, podemos hacer uso de programas de computadora que no siempre están a la mano, y que decir si es necesario una investigación más científica, algo más especial o sofisticado, para esto simplemente no tenemos la

información.

En las páginas siguientes se analizarán los métodos, el proceso, y los criterios necesarios que nos darán la pauta para crear una herramienta lo suficientemente útil para la correcta selección de los materiales y evitar la falla.

3.2. – Materiales y sus propiedades

En un principio explicaremos brevemente como están agrupados en familias los materiales y sus propiedades.

Los materiales se agrupan en familias y las más comunes en la industria moderna son:

Metales, Cerámicos y Orgánicos, dentro de los orgánicos se incluyen a las subfamilias de los plásticos, la del caucho y de la madera, y muy recientemente la familia de los materiales compuestos.

Un material generalmente lo identificamos por sus propiedades y estas pueden ser:

Físicas, Mecánicas, Térmicas, Eléctricas y Químicas.

Estas propiedades nos indican la estructura, la composición, funcionalidad y confiabilidad del material.

Pero la estructura del material podemos modificarla a través de aleaciones con otros materiales o por medio de cambios de temperatura o procesos de transformación, cambios que los materiales deben de soportar para utilizarlos en diferentes situaciones o determinadas necesidades.

Como ya se había mencionado, las propiedades de los materiales son bastante extensas sin embargo estas se pueden estudiar a través de dos tipos de especificaciones:

-Especificaciones de funcionamiento

-Especificaciones del producto

En el primer tipo de especificaciones nos basamos en las necesidades del proyecto a desarrollarse, características del producto y funcionamiento del producto, Ej. aceros para herramienta.

En las especificaciones de producto definimos los componentes de los diseños que son comprados o manufacturados, Ej. Aceros laminados en frío.

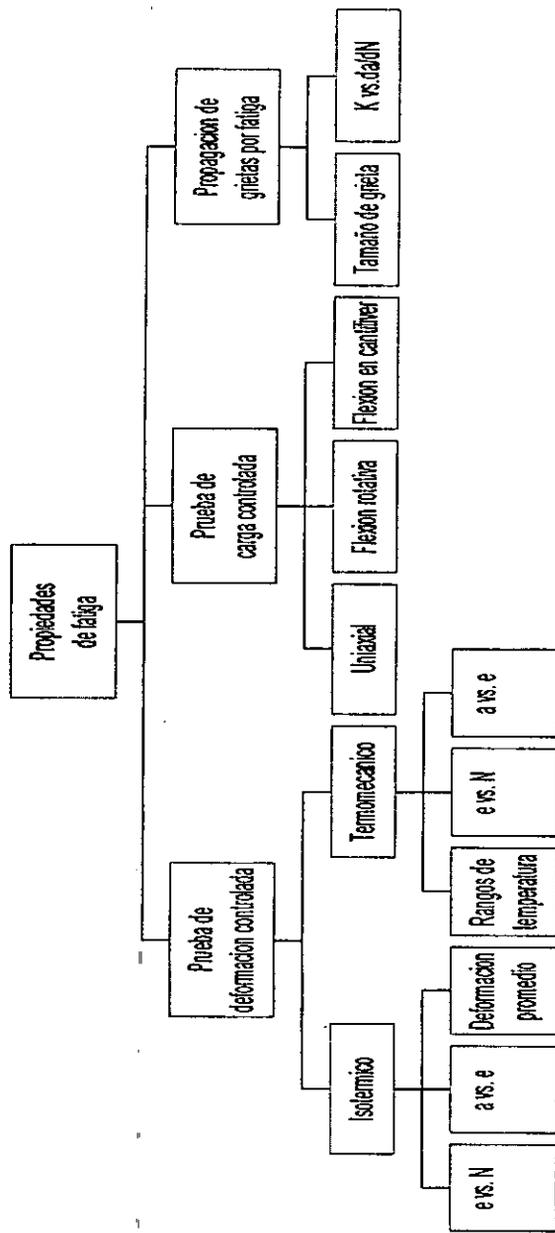
Ahora se muestra la Tabla 3.1. con las propiedades más importantes que afectan directamente a cualquier material y que son básicas para poder especificar algún producto y al mismo tiempo evaluarlo para poder prevenir la falla.

PROP. FISICAS	PROP. MECANICAS	PROP. TERMICAS	PROP. QUIMICAS	PROP. NUCLEARES	PROP. DE FABRICACION	PROP. ELECTRICAS
DENSIDAD	DUREZA	CONDUCTIVIDAD	OXIDACION	MEDIA VIDA	DURABILIDAD	CONDUCTIVIDAD
TEMP. DE FUSION	MODULOS DE ELASTICIDAD	CALOR ESPECIFICO	CORROSION Y DEGRADACION	ESTABILIDAD	TRATAMIENTO TERMICO	CONSTANTE DIELECTRICA
PRESION DE VAPOR	RESISTENCIA A LA FATIGA	COEFICIENTE DE EXPANSION	CORROSION POR FATIGA		FACILIDAD DE FUNDICION	
VISCOSIDAD	RESISTENCIA A LA TRACCION	RESISTENCIA AL FUEGO	ESTABILIDAD TERMICA		FACILIDAD PARA DOBLAR	
POROSIDAD	RESISTENCIA ULTIMA				FACILIDAD PARA MAQUINAR	
PERMEABILIDAD	PROP A LA FATIGA				FACILIDAD PARA SOLDAR	
REFLECTIVIDAD	TENACIDAD A LA FRACTURA					
PROP. OPTICAS	ALTA RESISTENCIA A LA TEMPERATURA					
	PROPIEDADES DE DESGASTE					

TABLA 3.1- LISTA DE PROPIEDADES BASICAS QUE AFECTAN CUALQUIER MATERIAL

Muchas propiedades, si no es que casi todas las propiedades antes mencionadas pueden considerarse con ciertos cambios cuando se ven afectadas por algún otro factor externo como puede ser fatiga o medio ambiente, como la tabla 3.2. que muestra las pruebas a las que son sometidos los materiales para determinar sus propiedades bajo cargas variables (fatiga).

TABLA 3.2.-EXPANSIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FATIGA



3.3. – Proceso para la selección de materiales.

En este subtema se describen en forma general el proceso para la selección de materiales, el cual es fundamental para evitar que el material y el diseño estén expuestos a que comiencen a fallar, la gran variedad de materiales nos obliga a seguir un método perfectamente bien definido y es que cuando nos enfrentamos al problema de seleccionar un material debemos primero comprender cual va a ser el significado de nuestra selección, debemos preguntarnos en primera instancia si el material que analizamos lo utilizaremos para un nuevo diseño o producto o en caso contrario si se usará en mejorar algún diseño existente, tomando en consideración la reducción de costos, mejoras en su funcionamiento o en el aspecto de seguridad por mencionar algunos.

Sin embargo casi siempre que optamos por cambiar el material para mejorar el diseño, nos comprometemos a cambiar el diseño mismo, ya que así podemos explotar totalmente el potencial de ese nuevo material y al hablar de cambiar el diseño también nos referimos a cambiar por ende el proceso de manufactura. Un ejemplo clásico es la comparación existente en el proceso de vaciado a un molde de una aleación, por decir algo, base zinc por este mismo molde pero ahora por inyección y con un material más noble como puede ser un polímero el cual es más económico, o sea que, no solo cambiamos el material sino también el proceso.

Los pasos en el proceso de selección de materiales se pueden definir de la siguiente manera:

1). -Análisis de requerimientos de materiales

En este punto debemos de determinar las condiciones bajo las cuales va a

trabajar el material, si va a estar sometido a las inclemencias del tiempo o si existe alguna condición extraordinaria que pudiera afectar su funcionamiento. Asimismo analizamos las propiedades críticas con las cuales trabajará el material.

2). -Comparación de todos los materiales que pudieran ser seleccionados como efectivos

A través de una extensa base de datos, la cual contiene las propiedades necesarias de cada material, obtenemos una lista preliminar de materiales que cubren los requerimientos obtenidos en el punto anterior.

3). -Selección de materiales que pueden ser candidatos.

En base a conceptos tales como; Fácil comercialización, bajo costo, fácil de fabricar, etc. y otros índices se seleccionan los materiales de la lista preliminar.

4). -Desarrollo de datos de diseño

Después del punto anterior y tener una lista más reducida de materiales, determinamos experimentalmente todas las propiedades de los materiales restantes para obtener cifras confiables por medio de estadísticas y conocer el desempeño del material que se supone se encontrará cuando esté en servicio.

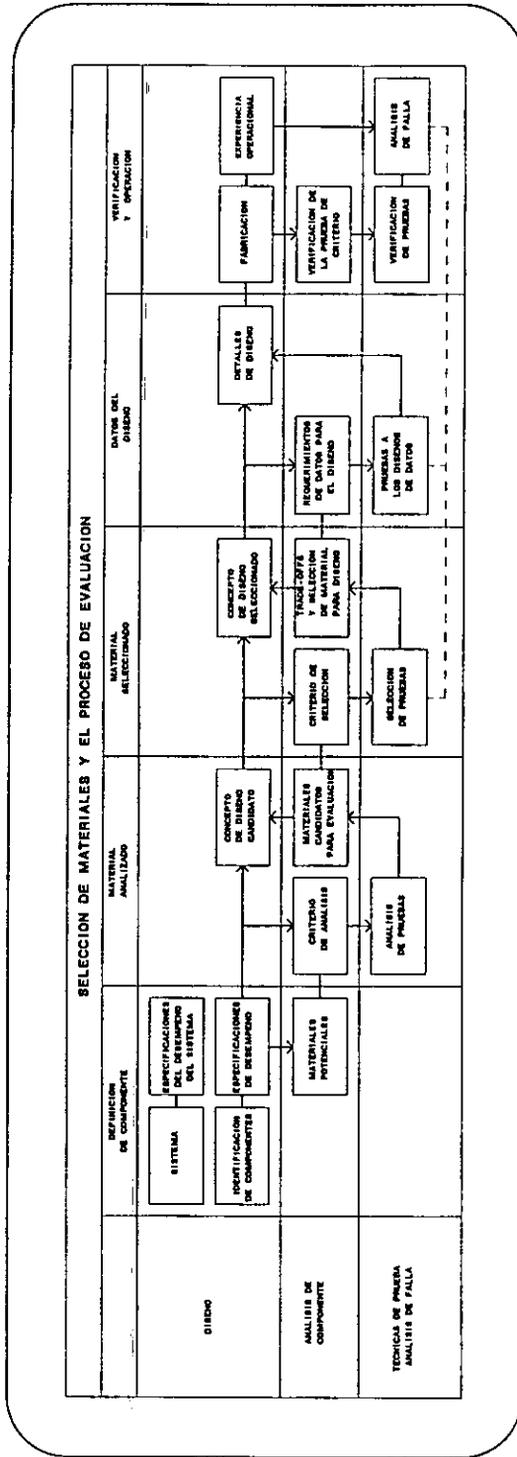
Ahora bien, en este proceso de selección del material adecuado a nuestras necesidades, existen fases inherentes a los pasos del proceso detallados anteriormente, una de ellas es la propiedad que tiene el material para que pueda ser filtrado, ya que todo material tiene un punto mínimo y un punto máximo de operación sin que se afecten sus características principales, la idea en esta fase es que no se rebasen estos límites, porque si esto ocurre entonces debemos decidir si este material lo analizamos para otra aplicación o si continuamos el proceso de selección pensando que en la selección final se involucran más

propiedades, su costo o su fabricación y pueda compensar positivamente el primer juicio que hemos hecho de este material.

Otra propiedad que tienen los materiales es la de los datos de diseño, porque en muchas ocasiones los proyectos no necesitan un examen tan severo o estricto y los datos obtenidos pueden cubrir perfectamente las recomendaciones que marcan los reglamentos o códigos existentes como pueden ser el ANSI o ASTM a menos que industrias tan sofisticadas como la aeroespacial o nuclear las cuales manejan parámetros más precisos y exigentes, los cuales son entendibles por la naturaleza de su giro ya que además de ser más delicados en sus procesos, generan pruebas más extensivas que dejen a los Ingenieros con la suficiente confianza para usar el material seleccionado.

A manera de ejemplo en la tabla 3.3. se muestra la selección de materiales y el proceso de evaluación de un proyecto complejo.

TABLA 3.3.- PROCESO DE SELECCION Y EVALUACION DE MATERIALES



Todos sabemos de la importancia que tiene que un proceso de manufactura o un método de fabricación sean lo más económicos posibles, el costo juega un importante papel para lograr este objetivo y lógicamente los materiales también se ven afectados por este concepto, deben ser baratos y nunca debemos de dejar descuidado este punto para una correcta selección del material, el costo básico de un material depende en primer lugar de la escasez o sea de que tanto material, después de ser seleccionado, se encuentra acaparado por distribuidores o productores, ya que esto genera que el material aumente su valor.

El material también al ser procesado o trabajado antes de manufacturarse, hablando específicamente del proceso consume cierta cantidad de energía que debe agregarse al costo del material. Y por último la demanda provoca fenómenos económicos que también hacen variar el precio final del material.

Podemos tomar como ejemplo la piedra o el cemento, materiales que se encuentran en forma abundante en la tierra y que su precio es relativamente bajo, mientras que materiales escasos como el diamante o el oro los cuales tienen un precio considerablemente más alto.

También se deben de considerar además de los costos extras explicados anteriormente los que se enumeran a continuación y que de alguna manera afectan el precio final de los materiales.

-Requerimientos metalúrgicos

Si algún material como los metales requieren de una dureza extra, la propiedad del material se modifica al procesar el metal a través de rodillos a alta

temperatura, este proceso se denomina laminado en caliente.

Así como alguna prueba física o química que se le practique al material.

-Dimensiones

El manejo especial de tolerancias, anchos o longitudes.

Cortes y afilados del material.

-Procesamientos

Ya sean de carácter superficial o térmico

-Cantidad

Muchos proveedores acostumbran descuentos o rebajas en grandes volúmenes.

-Empaque y embarque

Se considera también como se enviará el material depende de la distancia o el medio a utilizar para enviar el material ya sea en barco, avión, camión etc.

Tal y como se apunta es muy frecuente que todos estos costos no se identifiquen de primera instancia pero al final influyen notablemente en el precio final del producto.

3.4. – Los criterios en la selección de materiales.

Se debe estar conciente que el proceso de selección de materiales se ha desarrollado con el paso del tiempo a través de pruebas de acierto y error. Actualmente no tenemos una metodología precisa en la cual podamos confiar y donde el propósito de nuestro trabajo es precisamente el elaborar una metodología fácil y práctica en la cual podamos establecer parámetros más precisos y útiles. Existen criterios muy importantes que se han clasificado de la siguiente manera:

1. -Índice de costo contra rendimiento
2. -Índice de ponderación de propiedades
3. -Análisis del valor o valuación
4. -Análisis costo - beneficio
5. -Análisis de falla

Como se ha anotado con anterioridad los costos de los materiales son y deben ser los principios del proceso en la selección de materiales por considerarse el parámetro más importante en la reducción de precio de un proyecto.

Es muy común que nos encontremos con el problema de que un material cubra o satisfaga uno, dos o más requerimientos de funcionamiento, este problema lo podemos resolver a través de tablas o matrices que enlistan una serie de requerimientos de funcionamiento los cuales son clasificados de acuerdo a su importancia dándoseles un valor o peso a cada requerimiento y el más importante o de mayor peso es el que resulta seleccionado.

También debemos considerar cuando un diseño se considera complejo una serie de factores que pueden convertirse en riesgosos en el momento de crear el programa de manufactura, estos factores son:

- Horario programado
- Costo
- Facilidad para manufacturarse
- Rendimiento
- Mantenimiento
- Posibilidad de reparación

-Durabilidad

A continuación analizaremos los criterios de selección de materiales mencionados anteriormente.

1). - Índice de costo contra rendimiento

La relación costo-rendimiento es un criterio que usaremos como parámetro para poder optimizar la selección del material tomando como siempre en consideración la importancia que tiene el costo como uno de los factores más importantes que llegan incluso a controlar el desarrollo del proyecto.

Debemos tomar en cuenta un principio que está equivocado y que debemos de cambiar, ya que frecuentemente se cree que el criterio de que el costo de los materiales es el de dinero por el peso del mismo material, cuando en realidad lo más correcto es que el costo se mida en dinero por volumen del mismo material, tal es el caso de los plásticos que se miden en unidades de volumen, en lugar de unidad de peso.

Por otro lado el costo del material debemos considerarlo de la siguiente manera; al costo inicial del material hay que agregarle el costo de manufactura e instalación, y por último sumarle el costo de operación y mantenimiento, a este procedimiento lo llamaremos costo total del ciclo de vida del material.

De las partes del costo total del ciclo de vida del material, este costo se incrementa considerablemente en el punto de manufactura donde el fabricante se enfrenta a un mayor número de dificultades. Sin embargo el número de pasos en el proceso o el valor que cada una de ellas puede tomar, puede decrecer, lo cual beneficiaría en el costo final del material ya que su vida útil crecería. Esto se puede apreciar más claramente en la gráfica mostrada en la figura 3.4., en ella el

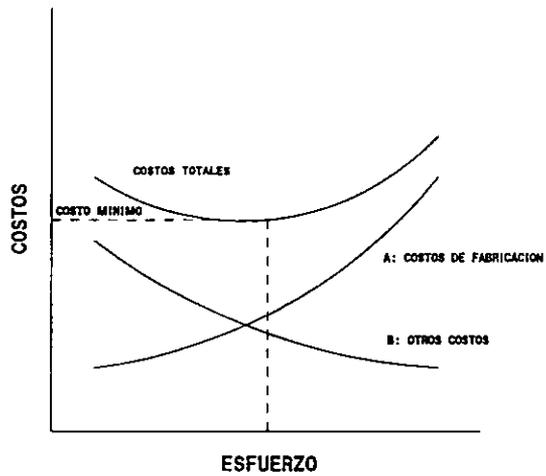


FIGURA 3.4.- RELACION ENTRE EL COSTO Y UNA PROPIEDAD DEL MATERIAL

costo total es la suma de A y B y en ella el valor óptimo ocurre con el costo mínimo.

Siempre hay que recordar que el costo del material esta íntimamente relacionado con el peso o volumen del material, y la gran mayoría de los problemas o de manera común giran en torno a la cuestión del peso de cada uno de los materiales, su resistencia y su rigidez.

Como ejemplo tomaremos el caso más simple de deformación de una barra en tensión uniaxial donde el esfuerzo de trabajo es igual a:

$$\sigma_w = \text{Fuerza axial} / \text{área transversal} = P / A$$

Si la sección transversal y las propiedades del material de 2 barras A y B son denotadas por " A " y " σ " respectivamente, la condición de igual resistencia en ambas barras esta dada por:

$$F = \sigma_a A_a = \sigma_b A_b \quad \text{sustituyendo el área}$$

$$F = \sigma_a D^2 a = \sigma_b D^2 b \quad \text{por lo tanto } D_b/D_a = (\sigma_a / \sigma_b)^{1/2}$$

$$\text{Pero si el peso de la barra es: } W = \rho v = \rho A L = \rho (\pi D^2 / 4) L$$

$$\text{Entonces } W_b / W_a = (\rho_b D_b^2 / \rho_a D_a^2) = \rho_b \sigma_a / \rho_a \sigma_b$$

Si el costo del material "A" es " M_a " \$ / Kg. Y el costo del material "B" es " M_b " \$ / kg. Entonces el costo de la barra hecha del material "B" para soportar la carga "P" es:

$$C_b = W_b M_b \quad \text{y} \quad C_a = W_a M_a$$

Así que sustituyendo

$$C_b / C_a = (\sigma_a \rho_b M_b) / (\sigma_b \rho_a M_a)$$

El costo por unidad de resistencia es $C = \rho m / \sigma$, en este ejemplo usamos

la resistencia a la deformación, pero en otras situaciones puede ser la resistencia a la flexión, resistencia a la fatiga o resistencia a la ruptura.

La relación para la estructura equivalente para igual rigidez, considera una viga de longitud "L" en cantiliver con un extremo libre. La deflexión en el extremo libre esta dada por $\gamma = (P L^3) / (3 E I)$

Donde "E" es el modulo de elasticidad e "I" el momento de inercia de la sección transversal de la viga.

La condición de igual rigidez en dos vigas de material "A" y "B" esta dada por:

$$E_a I_a = E_b I_b$$

Si consideramos una viga con sección transversal rectangular entonces:

$$I = (w h^3) / 12$$

Donde w = ancho y h = espesor

Con ancho y longitud constante el espesor de material es:

$$- h_b = h_a (E_a / E_b)^{1/2}$$

Y el costo relativo esta dado por

$$- C_b / C_a = (E_a / E_b)^2 (\rho_b m_b / \rho_a m_a)$$

Existen muchos índices que en capítulos posteriores serán mencionados

2). -Índice de ponderación de propiedades

Frecuentemente nos encontramos con el problema de que un material debe cumplir con dos o más requerimientos, a cada uno de ellos se les da un valor o cierto "peso" y el que mayor peso tenga será el material al que mayor importancia se le debe de dar y sobre todo el que mejor rendimiento va a tener.

El primer paso que se debe de dar para desarrollar este índice consiste en hacer una lista de las propiedades que en mayor o menor grado interactúan con el producto incluyendo los costos que se consideran como de vital importancia o de gran peso.

Después se indica cuales de ellas son críticas y cuales relativas, donde las críticas son las que no pueden dejar de cumplirse y relativas las que pueden ser cubiertas por los materiales considerados inicialmente.

Posteriormente se hace una búsqueda intensa de propiedades en libros, manuales o folletos especializados, para que después con toda esta fuente de información se conforme una lista de materiales candidatos, los cuales se suponen cumplirán los requisitos determinados inicialmente.

El índice de la propiedad del peso lo calcularemos al multiplicar el valor de la propiedad por el factor de peso, donde cada valor de la propiedad puede tener cualquier valor siempre y cuando no exceda los 100 puntos.

β = propiedad de escala

$\beta = (\text{valor numérico de la propiedad} / \text{valor más grande bajo consideración}) \times 100$

para las propiedades en las cuales es más deseable tener valores bajos como la densidad, costo, corrosión o resistencia eléctrica, el factor se formula así:

β = propiedad de escala

$\beta = (\text{valor más pequeño bajo consideración} / \text{valor numérico de la propiedad}) \times 100$

para las propiedades que no pueden ser expresadas con valores numéricos ej. Facilidad para soldar y resistencia al agua se utiliza una sencilla clasificación particular como la siguiente.

Figura 3.5.- Tabla de propiedades de un material calificado con valores numéricos subjetivos

Propiedad	A	B	C	D
Facilidad para soldar	EXCELENTE	BUENO	BUENO	REPROBADO
Calificación relativa	5	3	3	1
Variable de escala	100	60	60	20

El índice de rendimiento de material es:

$$- \delta R = \sum \beta_i w_i$$

donde \sum es la suma de todas las propiedades

el costo también se puede considerar como una propiedad

$$\delta' = \delta / m \rho$$

donde m = costo de materiales, ρ = densidad

El material con valores mayor de " δ " será el material apropiado en la aplicación estudiada.

3). - Análisis del valor o valuación

Quando mencionamos un análisis de valor o valor de ingeniería nos referimos a un sistema de técnicas para identificar y eliminar costos innecesarios sin comprometer de alguna manera la calidad y efectividad del diseño.

A pesar que esta técnica usualmente es aplicada a diversos tipos de problemas se aplica básicamente al problema de selección de materiales.

Este tipo de análisis usualmente es desarrollado por un equipo de ingenieros y supervisores que tienen diferentes puntos de vista, generando que el problema se vea de diferentes perspectivas. Sin embargo debido a la importancia del asunto que se analiza, es necesario el soporte y la aprobación de un alto directivo si queremos que el resultado del análisis sea más satisfactorio.

El plan de trabajo del análisis de valor consiste en estructurar una tabla en la que una serie de labores o funciones se desarrollan para estudiarla. Esta tabla considera todos los aspectos importantes necesarios para el análisis de un material así como un registro escrito que muestra los avances en este estudio.

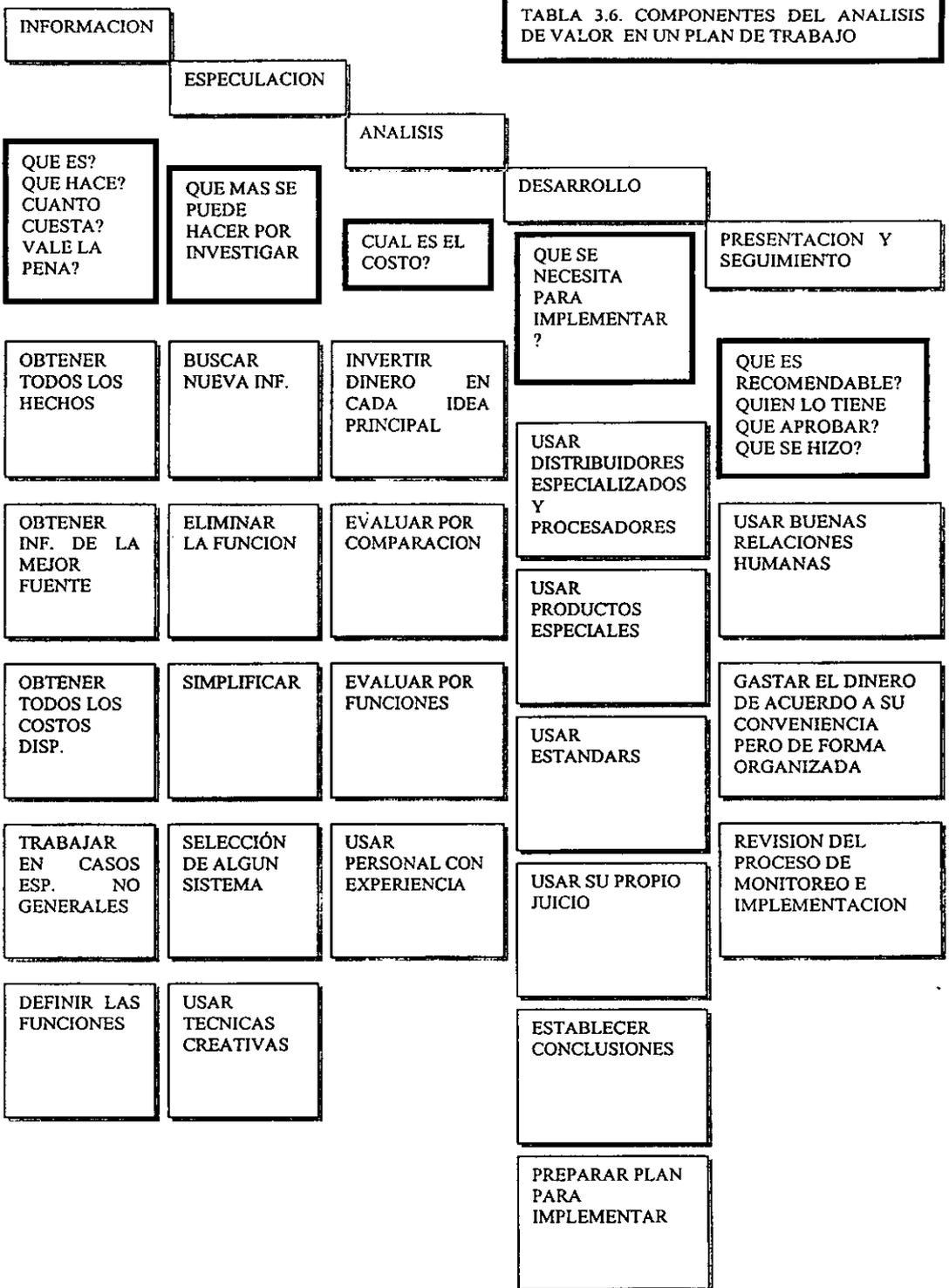
Primero debemos de evaluar la función del diseño o sistema, esta función es por lo general expresada por dos palabras; verbo y nombre, el verbo responde a la pregunta, que hace? Y el nombre responde a la pregunta, que hace que?.

Debemos de establecer perfectamente el problema, la función debe de ser identificada y no limitarnos a unas cuantas respuestas para resolverla.

Este método se ilustra en la tabla de la figura 3.6

Las funciones de un diseño o sistema se deben de dividir en funciones básicas y secundarias. Por ejemplo la función básica de pintar una superficie es protegerla del medio ambiente, la función secundaria es la de darle una buena apariencia. La habilidad de identificar funciones y distinguir entre básicas y secundarias es importante en el análisis de valor. La valoración del diseño solo entra en las funciones básicas y es la parte a la que debemos de darle mayor importancia.

TABLA 3.6. COMPONENTES DEL ANALISIS DE VALOR EN UN PLAN DE TRABAJO



Después de que las funciones han sido establecidas debemos seleccionar la que sea más importante y esto se determina al comparar los diseños a analizar, cuando se hace una mejora al diseño nos referimos al análisis anterior y al presente que se propone para reducir costos o aumentar la calidad y cuando nos referimos a un diseño nuevo se analizan los diseños, y se selecciona el que tenga un costo menor, es importante identificar elementos con alto costo y poner especial atención en ello.

Los pasos en el plan de trabajo para el análisis de valor son tantos como las posibles soluciones del problema, para la tabla anteriormente mencionada tenemos lo siguiente:

I.- Información

se reúne toda la información posible

II.- Especulación

En esta fase se genera por diferentes técnicas (lluvia de ideas, análisis, reportes, gráficos etc.) los significados de las alternativas para realizar las funciones básicas.

III.- Análisis

se involucra otro análisis para compararlo y refinar las alternativas de la fase anterior verificando si tenemos las funciones básicas y su costo preliminar.

IV.- Desarrollo

En esta fase se desarrolla un completo plan de implementación, seleccionándose finalmente junto con otros resultados paralelos.

V.- Presentación y seguimiento

Se presentan los resultados para que algún directivo apruebe las propuestas de

los análisis.

4). -Análisis costo-beneficio.

Dentro de la ingeniería es muy importante decidir sobre la mejor selección del diseño, material o proceso, cuando los recursos económicos son escasos.

Frecuentemente las comparaciones están basadas en un índice de costo beneficio, el cual nos muestra el capital necesario para invertir para producir cierto beneficio deseado.

Valor presente o costo anual de todos los beneficios

ICB = _____

Valor presente o costo anual de todos los costos

Donde ICB significa Índice de Costo Beneficio.

Un diseño o proyecto en el cual el índice es menor a "1" no siempre es idóneo ya que no se cubre el capital invertido para crear el diseño. Pero generalmente si este índice es mayor a "1" el proyecto es aceptable.

Los factores analizados deben ser los componentes más importantes y con un excelente desempeño. Muy frecuentemente en problemas de selección entre varias alternativas importantes, se deben de comparar beneficios y costos con diseños que pudieran usarse de referencia.

Las alternativas se clasifican respecto al costo, primero cual es la más económica tomándose como referencia inicial, estas se comparan con la siguiente alternativa más alta con relación al costo, que también debe de incrementar en beneficios. Si el índice de costo beneficio es menor a "1", esta segunda opción es

rechazada porque la primera alternativa es mejor.

Ahora se analiza la opción 3 y se compara y si el índice costo beneficio es mayor a "1" entonces esta opción será la mejor selección rechazándose ahora en esta ocasión la primera.

El índice costo beneficio lo podemos usar dentro de un contexto estricto de la ingeniería en la selección de materiales, siendo una práctica herramienta de decisión.

A pesar de que este método es muy usado este tiene problemas, puesto que los costos y beneficios son relativamente independientes, básicamente es un método que no es muy confiable y debe de enriquecerse con los mayores datos posibles.

5). -Análisis de falla

Por lo general las fallas que ocurren en el material son causadas por uno o más de los siguientes conceptos:

1.-Deficiencias en el diseño

a.- el material falla por no considerar las muescas que se crean en la superficie del material

b.- no se conoce en algunas ocasiones las cargas que soporta el material y como se comporta en combinación con el medio ambiente.

c.- dificultad para analizar en forma eficaz la fatiga en zonas con carga aplicada.

2. -Deficiencia en selección de material

a.- desconocimiento total de lo que ocurre en la relación entre condiciones de servicio y criterios de selección.

b.- en muchas ocasiones no existen datos sobre el material

c.- demasiada preocupación al costo del material y no a la calidad de este mismo material.

3. -El daño que sufre el material debido al proceso de manufactura

4. -Sobrecargas y otros abusos al material que afectan el servicio para el cual fue destinado.

5. -Inadecuado mantenimiento preventivo y correctivo

6. -Factores del medio ambiente

a.- condiciones que van mas allá de las permitidas para el diseño

b.- deterioro de las propiedades del material por exceso de tiempo de exposición al medio ambiente.

Sin embargo los materiales usados en Ingeniería fallan más frecuentemente en las siguientes condiciones:

1). - Deformación elástica excesiva

2). - Deformación plástica excesiva

3). - Fractura

4).- Pérdida de propiedades a través de la corrosión ocasionada por el medio ambiente.

Este análisis que es la base de nuestro trabajo será tratado más a fondo y a detalle en el siguiente capítulo.

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE FALLAS

4.1. – Introducción.

En los últimos años se han realizado múltiples estudios que han resultado fundamentales con relación a la resistencia de los materiales y la mecánica de la fractura. Estos fundamentos son la base para el desarrollo de los materiales su fabricación, el proceso metalúrgico, así como las condiciones de servicio que son también, de primordial importancia.

El fabricante deberá tener cuidado en lo concerniente a la composición del material, el tratamiento térmico, el diseño, y la fabricación de su producto, para que no se presente un sobre dimensionamiento que repercuta negativamente en los costos de producción, pero tampoco estén por debajo de un valor mínimo necesario, lo que resultaría una baja resistencia y confiabilidad.

Por otro lado, es de igual manera esencial que, tanto el ensamble como la manufactura sean realizados bajo condiciones apropiadas y con un mantenimiento adecuado.

Sin embargo, estos fundamentos son empleados en la ingeniería de materiales, que sirven para desarrollar las bases para líneas de investigación, así como conceptos de ciencia de materiales que son usados en el análisis de algunos tipos de fallas más comunes.

La amplitud de este capítulo va desde el origen fundamental de las fallas a través de los mecanismos de fractura hasta los principales métodos de análisis de fallas, ya que el objetivo principal es presentar los fundamentos del análisis de fallas.

4.1.1.-Definición y resistencia a la fractura.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran la curva esfuerzo - deformación ingenieriles para el acero con bajo contenido de carbono y el cobre. La relación que existe entre el esfuerzo y la deformación en la zona elástica es menor que 0.5 %.

Por otro lado el punto (llamado de cedencia) en el cual la deformación deja de ser elástica y se convierte en plástica, representa el valor de esfuerzo al cual la pendiente de la curva esfuerzo deformación deja de ser el modulo elástico.

Debido a la dificultad de determinar con precisión el punto de cedencia, se han hecho varias aproximaciones, la más común de ésta es la compensación del esfuerzo de cedencia como el esfuerzo al 0.2 % de la deformación plástica. En los aceros de bajo contenido de carbono y en algunas otras aleaciones, la cedencia comienza en un "punto superior" y termina en un "punto inferior".

Los resultados de los ensayos de tracción son muy valiosos para el diseñador, por diversas razones. Por ejemplo, ya que en la mayoría de las estructuras de ingeniería solo la deformación elástica es deseable, es importante conocer el esfuerzo de cedencia del material para establecer la máxima carga que puede ser empleada de manera segura, otro ejemplo de la utilidad de este ensayo es que la tenacidad puede ser medida por medio de la curva esfuerzo-deformacion, a traves de el área bajo las curvas tal y como se muestra en la figura 4.3.

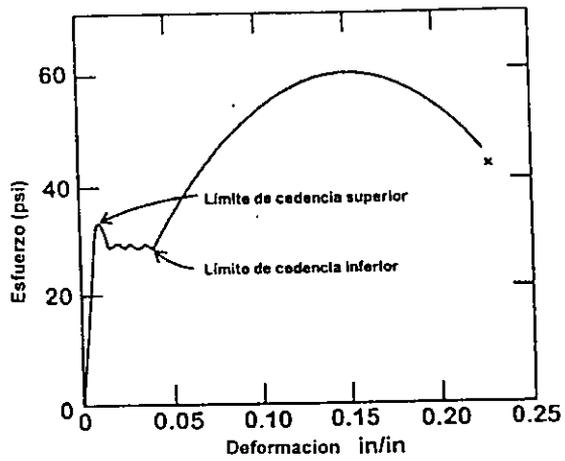


Fig. 4.1. Curva esfuerzo-deformación del acero con bajo contenido de carbono.

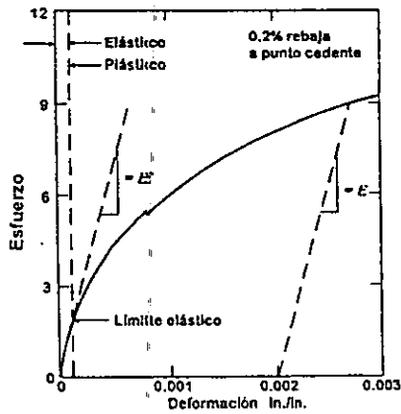
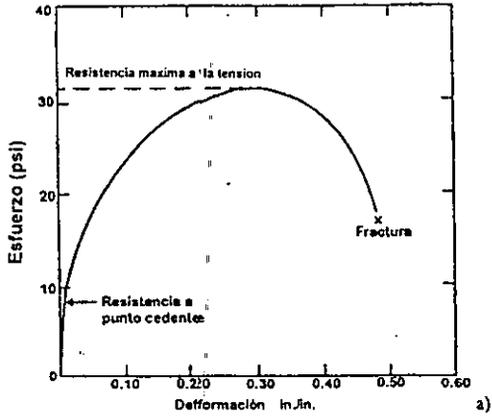


Fig. 4.2. Diagramas esfuerzo deformación ingenieril para cobre policristalino. (a) Diagrama completo. (b) Región elástica y el inicio de la plástica, mostrando la compensación del esfuerzo de cedencia al 0.2%.

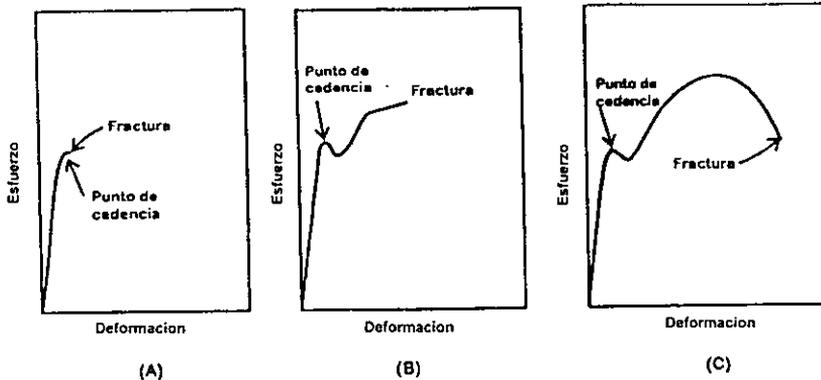


Fig. 4.3. Curvas esfuerzo-deformación bajo tensión.
 a) Fractura frágil, b) Fractura dúctil-frágil, c) Fractura dúctil

4.1.2.- Definición de fractura.

Una fractura es la separación de un cuerpo en dos partes. La naturaleza de una fractura es distinta dependiendo del tipo de material y se encuentra frecuentemente afectada por el origen de los esfuerzos aplicados, las características geométricas de la muestra, las condiciones de temperatura, así como, la velocidad de deformación. Las diferencias entre los tipos de fractura producidas en materiales dúctiles y frágiles, sometidos a esfuerzos alternados o a altas temperaturas, varían desde su nucleación hasta su propagación, debido a cada una de dichas condiciones.

4.1.3.- Definición de falla

Una parte de un montaje considerado habrá fallado cuando:

- 1) La parte llega a ser completamente inoperable.
- 2) La parte está aún en operación pero no estará durando mucho tiempo funcionando satisfactoriamente.

3) Serios daños han hecho a la pieza inconfiable o inseguro para un uso continuo y por lo tanto es necesario removerla inmediatamente para repararla o cambiarla.

4.1.4- Factores que afectan a las fallas.

Los factores que afectan a las fallas son:

Estado de esfuerzos: Tracción, compresión, torsión y cortante.

Condiciones de carga: Estática, impacto, cíclico.

Condiciones térmicas: Calentamiento rápido o enfriamiento cíclico.

Condiciones ambientales: Atmósfera oxidante, atmósfera corrosiva, etc.

Estos factores nos lleva a diferentes fallas tales como:

Fallas por distorsión, por fatiga, por corrosión, por desgaste, por corrosión bajo esfuerzo, por elevadas temperaturas, etc.

4.2. – Fuentes fundamentales de falla.

Las fuentes fundamentales de fallas incluyen muchos aspectos tales como el diseño, las imperfecciones y **selección de materiales**, la fabricación y/o el procesamiento, el montaje, pruebas, control de calidad, revisión, almacenamiento, transporte, condiciones de servicio, mantenimiento, y la exposición a sobrecargas o daños mecánicos y/o químicos al estar en servicio. A menudo son más de una las causas que provocan una falla.

4.2.1.- Imperfecciones en el material.

Muchas fallas se originan debido a las imperfecciones en el material, tanto las imperfecciones internas como las superficiales podrían reducir la resistencia del material, ya que brindan sitios o zonas preferenciales para la propagación de la fractura al actuar como muescas, picaduras o condiciones para desarrollar corrosión intergranular.

Los efectos de muescas, sin atender ahora lo que la produjo, llevan a que el esfuerzo en un miembro cargado se incremente abruptamente en la raíz, por la concentración de esfuerzos en ese punto.

La distribución no uniforme de esfuerzos axiales, en la muestra cargada y la concentración de esfuerzos en la raíz de la muesca queda mostrada en la curva marcada en la figura 4.4.

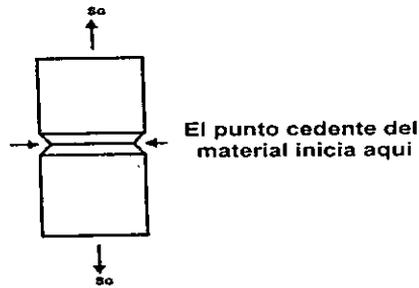


Figura 4.4.a) Una muestra con muesca sujeta a tracción

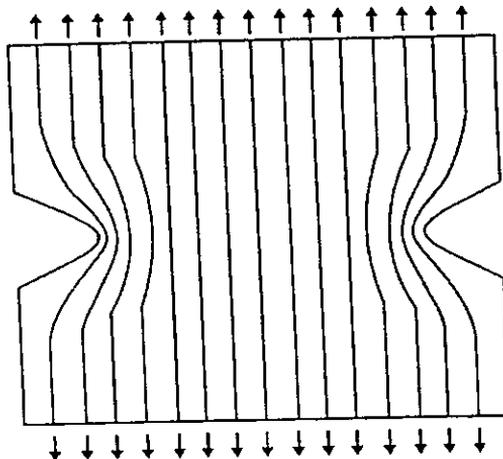


Fig. 4.4. b) Representación esquemática de los campos de esfuerzos en una sección longitudinal en una muestra cilíndrica y con una muesca en la circunferencia sometido a tracción. Las líneas verticales indican la dirección de los esfuerzos principales.

Bajo condiciones puramente provocadas por esfuerzos elásticos; las condiciones y la concentración de esfuerzos en la raíz de la muesca llegan a ser extremadamente alta cuando el radio formado en la raíz se aproxima a cero. De cualquier modo, cuando en la raíz excede el esfuerzo de cedencia del material entonces se presenta flujo plástico, tendiendo este a disminuir lo agudo de la muesca, reduciendo el esfuerzo de concentración en la raíz.

4.2.2.- Iniciadores de fractura.

Muecas de cualquier tipo pueden ser encontradas en casi cualquier estructura, según las reglas del diseño las muescas deben ser confinadas a la zona de bajos esfuerzos nominales. Si se tiene la presencia de muescas, ya sea accidental o intencionalmente, lo cierto será que cuando una fractura ocurra casi siempre se iniciará en esa muesca. Es importante saber que muchas estructuras hechas con materiales dúctiles pueden fracturarse rápidamente si las muescas están presentes.

4.2.3.- Deficiencias en la selección del material.

La selección de materiales como una parte de todo el procedimiento del diseño debe hacerse considerando las características dimensionales y geométricas.

4.2.4.- Uso inadecuado de los resultados de pruebas mecánicas.

Aunque la mayoría de las especificaciones normalizadas se obtienen de ensayos de tracción, y el amplio uso de dichos ensayos son útiles en un principio como una rutina para verificar la calidad relativa de diferentes lotes de un material dado; los datos generados por las pruebas se usan en un principio como un índice de calidad del lote o para conocer la variabilidad del lote de material. Frecuentemente usar material con alta resistencia a la tracción es perjudicial en piezas donde existen

concentradores severos de esfuerzos, para los cuales los mecanismos que podrían provocar la falla son comúnmente:

- Fatiga
- Fractura frágil
- Corrosión posiblemente combinadas con carga estática o cíclica.

Un ejemplo de la influencia de la temperatura en la resistencia a la tracción y en la resistencia al impacto es mostrado en la figura 4.5.

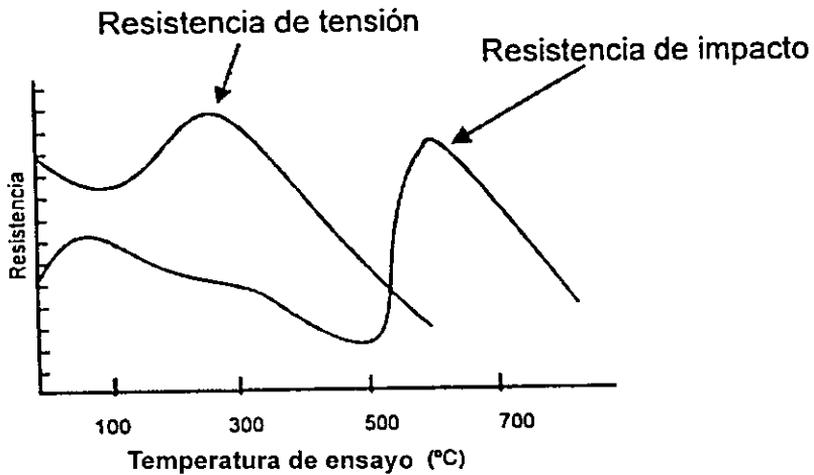


Fig. 4.5. Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas del acero.

4.3. – Deficiencias en el diseño.

La deficiencia en el diseño que se comete más frecuentemente y que también podría ser evitada es la muesca mecánica en la zona donde se localiza el más alto esfuerzo, principalmente en las piezas que están sujetas a cargas de flexión y torsión, por ejemplo:

Los ejes, que son sometidos a cargas cíclicas de flexión en una sola dirección, pueden fracturarse por fatiga en el radio del filete.

Una característica del diseño que de manera especial lleva a la falla y debe ser evitada es la intersección de dos muescas mecánicas y un radio de filete implementado en el eje, como en el caso de un chavetero.

4.3.1.- Cambio en el diseño.

Algunas deficiencias en el diseño podrían darse de la imposibilidad de calcular relevadores de esfuerzos para piezas o elementos complejos, así como, por la información insuficiente sobre los tipos y magnitudes de cargas a las que serán expuestas las piezas en servicio. Existen otros factores tales como la corrosión y la presencia de imperfecciones en el material, que podrían contribuir a sensibilizar al material para fallar antes de lo esperado.

4.3.2.- Selección del material.

Para la selección del material óptimo se deben conocer las características específicas del material a través de las cuales se mide cuantitativamente su resistencia a las fallas por un mecanismo dado, en algunos casos deberá ser necesario hacer un balance entre las características o propiedades de los materiales y entre factores tales como el costo, la facilidad de fabricación etc. Cada problema se

debe conocer individualmente para que por medio de experiencias muy similares la selección del material sea la mas adecuada.

4.4. – Deficiencias en la manufactura.

La susceptibilidad a fallar de los materiales, también está relacionada con los procedimientos de manufactura impropios, de que estos sean incompletos o ambiguos, de cambios hechos en los procedimientos sin una evaluación completa, fallas al seguir el proceso especificado, errores humanos o daños accidentales.

4.4.1.- Maquinado y esmerilado.

El maquinado y esmerilado, con regularidad dejan esfuerzos residuales y superficies rugosas. El desbaste y esmerilado severo son una fuente de sobrecalentamiento y en consecuencia puede ablandar algunos puntos localizados, y pueden producir fisuras en aceros endurecidos.

4.4.2.- Marcas de identificación por impacto.

Marcas de identificación, tanto las dentadas por impacto como las producidas por electroerosión son una fuente potencial de fallas, ya que provocan que una región de la pieza o material se encuentre sometida a altos esfuerzos.

4.4.3.- Maquinado a través de descargas eléctricas.

El maquinado por descargas eléctricas en un proceso que produce fusión y genera una región llamada zona afectada por el calor, esto puede provocar grietas durante el servicio si no son debidamente controladas especialmente en áreas con alta concentración de esfuerzos en aceros tratados con una dureza superior a los 50 o 55 Rockwell C.

4.4.4.- Fallas al realizar un tratamiento térmico.

Pueden ocurrir diversos errores al aplicar un tratamiento térmico tales como, sobrecalentamiento, no alcanzar la temperatura austenítica, no dar el revenido adecuado, uso de bajas temperaturas de endurecimiento, introducción de gradientes excesivos de temperatura, revenido, recocido, precipitación a algunas piezas o aleaciones específicas.

4.4.5.- Grietas por temple.

Las grietas en el temple presentan algunas características que son:

1. - Por lo general una fractura de este tipo va de la superficie de la pieza hacia su centro describiendo una trayectoria recta. La grieta, también, comúnmente abre o separa y es probable que exhiba algo de descarburización cuando se examine microscópica o macroscópicamente.
2. - Debido a que la fisura en el temple ocurre relativamente a bajas temperaturas, la fisura no exhibirá ninguna descarburización cuando sea examinada al microscopio.
3. - La superficie de fractura exhibirá una textura cristalina fina, si el material fue revenido después del temple, la superficie de la fractura podría tomarse ennegrecida por oxidación.

4.4.6.- Retraso del agrietamiento en el temple.

Un concepto erróneo muy común es que las fisuras en el temple pueden ocurrir solo mientras la pieza de trabajo esta en el medio de enfriamiento. De hecho las fisuras por temple pueden ocurrir una hora, un día, o una semana después del enfriamiento, si la pieza se pone en operación después del endurecimiento y no se hizo el revenido.

4.4.7.- Fallas debidas a recubrimientos electrolíticos.

Uno de los principales problemas que se presentan durante los recubrimientos electrolíticos como el galvanizado de partes de acero es la absorción de hidrógeno, lo que puede llevar a la formación de escamas o a una fragilización general.

4.4.8.-Arcos electrolíticos notables.

Este es otro problema que se puede presentar en los recubrimientos electrolíticos, aunque un arco notable puede también aparecer durante la limpieza electrolítica, inspección por partículas magnéticas y pruebas que requieren de contacto con la energía eléctrica, así como la soldadura.

4.4.9.- Fallas debidas a esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales son aquellos que existen en una pieza y son independientes de las fuerzas externas o donde se aplica moderadamente, cada operación de manufactura afecta el valor de los esfuerzos residuales en diferentes grados.

Por ejemplo en la formación de cabezas en frío, estirado, extrusión en frío, embutido, doblado, enderezado, rectificado, maquinado, laminado superficial, baño con perdigones y el pulido son procesos mecánicos que producen esfuerzos residuales debido a la deformación plástica. Por otro lado los procesos a temperaturas elevadas que producen esfuerzos residuales son el laminado en caliente, soldadura, corte con soplete y tratamientos térmicos (a través de la expansión y concentración térmica o de la transformación alotrópica), también es producida por la carburización y nitruración.

Los procesos de tratamiento térmico que producen generalmente esfuerzo compresivo residual son los de endurecimiento superficial. La soldadura suele

producir esfuerzos residuales tensiles, debido a la contracción ocasionada en el metal a soldarse durante el enfriamiento desde la temperatura a soldar.

4.4.10.- Descarburización.

Durante los tratamientos térmicos algunas veces se inducen fallas por:

- a) Fatiga; debido a que se reduce ampliamente el limite de resistencia de la superficie
- b) Por distorsión de pequeñas partes con lo que se reduce la resistencia promedio de la sección.

La descarburización es particularmente perjudicial para la vida en servicio de resortes y ejes pequeños, ya que en estos esfuerzos superficiales son muy altos.

4.4.11.- Decapado de los recubrimientos electrolíticos.

El decapado y los recubrimientos electrolíticos son bien conocidos por su facilidad para producir cargas de hidrógeno y consecuentemente daños por hidrógeno en aceros de alta resistencia.

La limpieza y ataque tanto químico como electrolítico en el cual se genera hidrógeno, producen efectos similares, especialmente cuando estos procesos son seguidos inmediatamente de la deposición de un recubrimiento metálico que impide la salida de hidrógeno absorbido del metal base. La forma de llevar a cabo los procesos deben ser cuidadosamente realizados en aplicaciones de este tipo para minimizar la absorción de hidrógeno y, subsecuentemente, si fuera necesario eliminar el hidrógeno por un proceso conveniente de calentamiento.

4.4.12.- Soldadura.

Uno de los tipos más serios de fallas que está relacionado con la soldadura es la conocida corrosión bajo esfuerzo en aceros inoxidable austeníticos, especialmente cuando se utilizan en calentadores, partes de equipos para transferencia de calor y

recipientes a presión. En algunos casos, la operación de soldadura por si misma puede ser la causa de problemas, sobre todo cuando ésta implica un calentamiento muy alto en la pieza, ya que este puede hacerla susceptible a corrosión bajo esfuerzo, mientras que por otro lado aplicar relevadores de esfuerzos después de la soldadura podría existir un factor de sensibilización el cual podría conducir a la falla.

4.5. Fallas como resultado de la fragilización.

Hay diversas formas de fragilizar partes del hierro y acero que llevan a una fractura de este tipo y que pueden ocurrir por las siguientes condiciones:

1. - Fragilización durante los tratamientos térmicos o en servicio a altas temperaturas.
2. - Fragilización ambiental.

Estas formas de fragilización se detallan a continuación

4.5.1.- Fragilización por envejecimiento por deformación.

Cuando se deforma un acero al carbono su dureza y su resistencia aumentarán cuando ocurre el envejecimiento, dando como resultado una pérdida de ductilidad. Las láminas rimadas son particularmente susceptibles a la fragilización por envejecimiento por deformación. Estos aceros son laminados moderadamente para evitar el punto de cedencia. El regreso del punto de cedencia o la presencia de las bandas de Lüders en la curva esfuerzo deformación es la evidencia que señala que la fragilización por envejecimiento por deformación ha ocurrido, tal y como se muestra en la figura 4.6. El grado de fragilización es función de la temperatura de envejecimiento y el tiempo que la pieza se someta a esta temperatura.

4.5.2.- Fragilización por envejecimiento en el temple. (Precipitación en enfriamientos bruscos).

La fragilización por envejecimiento en el temple es una función del tiempo dependiendo de la temperatura de envejecimiento hasta que se alcanza el grado máximo de fragilización. Una disminución en la temperatura de temple reduciría el grado de fragilización. El enfriamiento rápido desde una temperatura de 560°C y menores no producen fragilización por envejecimiento.

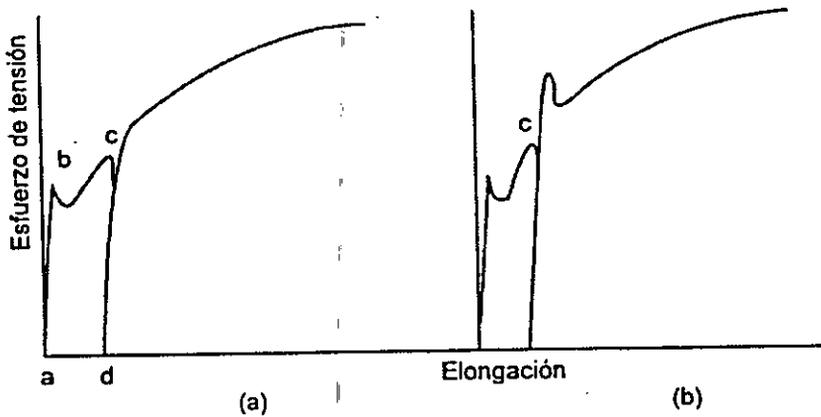


Fig 4.6. a) Carga removida de la muestra en el punto c y que se vuelve a cargar dentro de un corto periodo de tiempo. b) Carga removida en el punto c y aplicando nuevamente la carga después de un largo periodo de tiempo.

Los aceros al carbono más susceptibles para la fragilización por temple son aquellos con contenidos de 0.04 a 0.12%, si se incrementa el contenido de carbono sobre 0.12% se reducirá el efecto.

La fragilización por envejecimiento en el temple resulta de:

- a) La precipitación de solutos de carbono en las dislocaciones existentes y
- b) El endurecimiento por precipitación debido a la diferencia en la solubilidad sólida del carbono en ferrita a diferentes temperaturas. El enfriamiento rápido en estos aceros produce una solución de carbono en ferrita sobresaturada.

Por lo tanto envejecer a temperatura ambiente permitiría que se precipitara el exceso de carbono en solución.

4.5.3.- Fragilidad azul.

Cuando los aceros simples al carbono y algunos aceros aleados son calentados entre 200 y 350°C hay un incremento en la resistencia y una marcada reducción en la ductilidad y resistencia al impacto. A lo cual se le conoce como Fragilidad Azul. Es llamado así porque este fenómeno ocurre en el rango de calentamiento azul entre 200 y 300 °C.

Por otra parte si se deforma el acero y es calentado en el rango "azul" habrá un aumento de la dureza y en la resistencia a la tracción, esto después de un enfriamiento a temperatura ambiente. Por otro lado, al incrementar la velocidad de deformación se incrementa el rango de la temperatura de fragilidad azul.

4.5.4.- Fragilización por revenido.

En ciertos aceros la fragilización por revenido es causada por:

- a) Revenido dentro de un rango de temperatura crítica, o
- b) Por enfriamiento lento después de revenir a altas temperaturas.

Un revenido a la temperatura crítica da como resultado una fragilización del material, sin importar la velocidad de enfriamiento, aunque el grado de fragilización variará de acuerdo a la rapidez de enfriamiento con que se realice y al tiempo que se

haya mantenido a la temperatura crítica. Se tiene que un rápido enfriamiento desde la temperatura de revenido más un corto tiempo a la temperatura crítica minimiza la fragilización, mientras que, en un enfriamiento lento el grado de fragilización dependerá de la velocidad específica de enfriamiento.

4.5.5.- Fragilización a 350°C.

Esta fragilización en los aceros de baja aleación y alta resistencia ocurre a una temperatura aproximada que oscila entre los 200 y 350°C. Esta ocurre principalmente en aceros que han sido tratados térmicamente para obtener martensita revenida, por lo que es también conocido como fragilización de martensita revenida. Los aceros con microestructura de bainita inferior también son susceptibles a la fragilización a 350°C aunque los aceros con microestructuras perlíticas y algunos otros bainíticos no lo son.

4.5.6.- Fragilización entre 400 y 500°C

Aceros inoxidables de alto contenido de cromo y grano fino poseen normalmente buena ductilidad. Aunque si son calentados a una temperatura de entre 400 y 500°C y se conservan en este rango por un largo periodo, el material se endurece y se fragiliza. En los aceros inoxidables ferríticos con alto contenido de cromo fragilizados, existen dos tipos de ferrita una rica en hierro y otra en cromo.

4.5.7.- Fragilización por la fase sigma.

La formación de la fase sigma en aceros inoxidables ferríticos y austeníticos cuando están expuestos a una temperatura en el rango de los 550 y 900°C y largos periodos de tiempo da como resultado, después de enfriarlos a temperatura ambiente, una fragilización del material.

La fase sigma se puede formar por:

a) Enfriamiento lento después de una temperatura de 1090-1150°C.

b) Templando en agua desde una temperatura de 1090-1150°C seguido por un calentamiento de 550 a 980°C, donde el calentar a 850 °C, produce el efecto más grande.

4.5.8.- Fragilización por grafitización.

La grafitización de tuberías de acero al carbono y al carbono-molibdeno han causado diversas fallas sobre todo cuando éstas se utilizan en plantas termoeléctricas y en refinerías. La formación de grafito se da generalmente en una región cercana a la zona afectada por el calor producto de la soldadura, lugar donde el metal ha sido justamente calentado sobre el límite inferior de la temperatura crítica inferior. La tendencia a grafitizarse por parte de este tipo de aceros aumenta si el contenido de aluminio es mayor al 0.025 %. Se debe mencionar que los aceros al carbono-molibdeno presentan una mayor resistencia a la grafitización que los aceros al carbono, de igual forma los aceros desoxidados con silicio pueden también ser susceptibles a la grafitización. Mientras que si la desoxidación se hace con titanio se obtiene una mayor resistencia a presentar este problema.

4.5.9.- Fragilización de aceros galvanizados.

La fragilización de aceros galvanizados puede ocurrir en largos periodos de exposición a elevadas temperaturas debajo de la temperatura de fusión del zinc del recubrimiento. Lo que pasa es que ocurre un proceso de difusión y el zinc que se encuentra en el recubrimiento se difunde a los límites de grano de hierro formándose una red intergranular frágil formada por compuestos intermetálicos hierro-zinc. La presencia de este compuesto intermetálico puede conducir hacia una fractura frágil.

4.6. – Fragilización ambiental.

4.6.1.- Fragilización por hidrógeno.

La fragilización por hidrógeno ha sido un problema de mucho tiempo, obtener conocimiento cuantitativo producto de la observación de la influencia del hidrógeno en los metales es difícil, ya que el hidrógeno tiene una extraordinaria movilidad en el acero y en otros metales, este puede provenir de diversas fuentes, como de vapor de agua, decajado y electrólisis.

El hidrógeno se disuelve en aceros para formar una solución sólida intersticial, la solubilidad del hidrógeno aumenta mientras mayor sea la temperatura, incrementando aun más hasta que alcanza el punto de fusión del material, ya que como sabemos que la más grande cantidad de hidrógeno se disuelve con el acero fundido, aumentando la posibilidad de defectos (porosidad, escamas, agrietamiento por enfriamiento) al solidificar el acero. Por otro lado el hidrógeno es más soluble en austenita que en ferrita (aun en las fases alfa o delta) y por esto las escamas son raramente observadas en aceros austeníticos.

4.6.2.- Agrietamiento por corrosión bajo tensión.

El agrietamiento de corrosión bajo tensión es un proceso de falla debido a condiciones mecánicas y ambientales, con la combinación de los esfuerzos mecánicos y un ataque químico para iniciar y propagar la fractura en un metal.

Este tipo de corrosión se produce por la acción sinérgica de esfuerzos de tracción constantes y un medio ambiente corrosivo específico. Esta acción provoca una falla que ocurre más rápidamente que si los efectos de las cargas y el medio ambiente se presentaran separados y simplemente se juntarían.

4.6.3.- Fallas

Los daños que ocurren en una pieza durante su servicio pueden causar fracturas dúctiles o frágiles en la misma. La fractura frágil o dúctil es el proceso a través del cual la separación final ocurre en partes que han sido agrietadas en el servicio por otros mecanismos como fatiga, corrosión bajo tensión. Estas fracturas también podrían provenir por efectos de temperatura, como:

- a) Fragilización por fase sigma.
- b) Pérdida de dureza en tratamientos térmicos o aleaciones endurecidas por deformación, y
- c) En servicio a temperaturas inferiores a la de la temperatura de transición dúctil frágil.
- d) El calentamiento o enfriamiento rápido durante el servicio.

El servicio induce a ciertas imperfecciones, por ejemplo, fisuras poco profundas por fatiga, marcas por efectos térmicos, y rayas, que podrían llevar a fracturas dúctiles debido a la reducción del área transversal y porque actúan como concentradores de esfuerzos, o podrían llevar a una fractura frágil si el tamaño del defecto o imperfección excede al crítico.

4.6.4.- Fallas resultantes de muy bajas temperaturas.

Un material dúctil puede fallar de manera frágil cuando la temperatura de servicio llega a ser mas baja que la del rango de temperatura de transición dúctil-frágil, como se muestra en la figura 4.7.

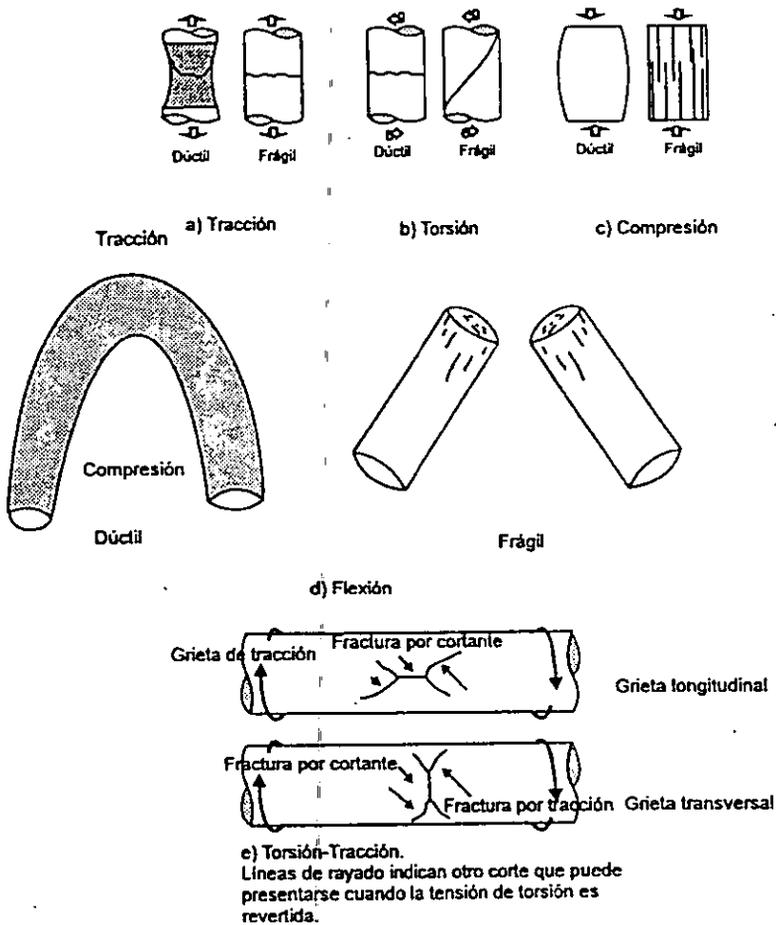


Fig. 4.7. La apariencia de las fisuras bajo diversas orientaciones de esfuerzos..

4.7. – Mecanismos de fallas.

4.7.1.- Identificación del tipo de fallas.

Al realizar un análisis de falla requiere en primer lugar de la identificación de la falla, la cual puede ocurrir debido a uno o más mecanismos incluyendo los daños superficiales como corrosión o desgaste y distorsión elástica o plástica. Y en segundo lugar los diversos tipos de fallas por fractura, incluyendo aquellas producidas por medios ambientes químicos o térmicos, que se describen y se clasifican a continuación:

4.7.2.- Clasificación por condiciones de carga.

Una fractura que es el producto del incremento en la carga a una velocidad baja o moderada hasta el punto de fractura del material, es comúnmente llamada fractura por sobrecarga; pero cuando la carga es incrementada a alta velocidad, la fractura que resulta se denomina por impacto. La fractura por esfuerzo de ruptura se produce al aplicarse y mantenerse una carga estable. La fractura por fatiga es generada por la aplicación repetida o cíclica de la carga.

4.7.3.- Clasificación por la velocidad de crecimiento de grieta.

Las grietas que llevan a una fractura dúctil crecen generalmente a bajas velocidades, se le denomina agrietamiento "LENTO" (conocido como crecimiento de grieta estable) crece solo cuando se aplica una carga. Cuando la fisura de crecimiento inestable puede crecer a velocidades altas, se le denomina agrietamiento "RÁPIDO" puede continuar bajo esfuerzos elásticos internos, sin necesidad de que se le este aplicando una carga externa, y puede llevar a una catastrófica falla frágil de la estructura. La velocidad de crecimiento de la grieta disminuye de manera significativa con el aumento de la temperatura, por lo que algunas temperaturas podrían tener

deformación plástica y fractura frágil o dúctil. Los efectos de la temperatura en la fractura, ductilidad o fragilidad, se muestran en la figura 4.8. La velocidad de crecimiento de grieta además de ser afectada por la temperatura, es también afectada por:

- La composición química
- La microestructura
- El tamaño del grano de la aleación
- El tamaño de la pieza.
- La dirección de la carga
- La velocidad de deformación
- El medio ambiente químico.

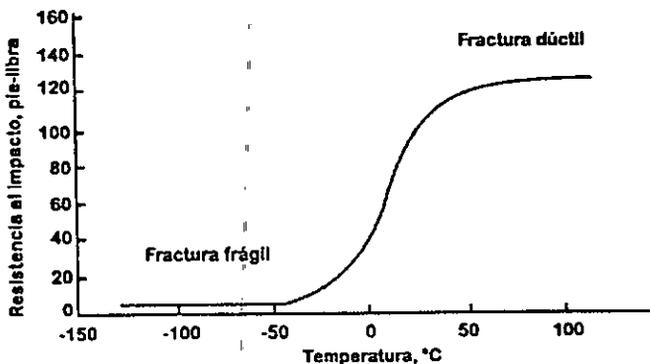


Fig. 4.8. Curva representativa obtenida a través del ensayo de impacto Charpy que muestra la transición entre fractura dúctil y frágil.

4.7.4.- Clasificación por factores del medio ambiente.

Una falla es el resultado de factores térmicos, tales como altas y bajas temperaturas pueden ser clasificados como sigue:

4.7.6.- Clasificación de observación microscópica (Microfractografía)

Los patrones microscópicos seguidos por cualquier fractura en un metal sirven para clasificarlas como transgranular (por unión de microhuecos, clivaje o fatiga) o intergranular (por separación de límite de grano con o sin unión de microhuecos). Las características de la microfractografía son:

DUCTILES

- Hoyuelos
- Micro grietas

FRAGIL

- Clivaje
- Piedra de azúcar
- Patrón de marcas de río
- Lenguas

Todas las fracturas que suceden en metales de ingeniería pueden ser agrupadas dentro de dos o más de las siguientes clasificaciones generales:

- Fractura transgranular:

Unión de micro huecos o micro grietas

Clivaje

- Cuasi clivaje (Combinación de clivaje y unión o coalescencia de micro huecos)

- Fractura intergranular por:

Separación de límite de grano, con o sin unión (coalescencia) de micro huecos.

4.8. – Fracturas dúctiles.

Las fracturas dúctiles se caracterizan por desgarrar el metal, produciendo una gran cantidad de deformación plástica y un gasto considerable de energía. La fractura dúctil por tracción casi siempre tiene una apariencia fibrosa y gris (opaca) y se clasifican en una escala macroscópica tanto como:

- Fractura por tracción formando caras planas en materiales dúctiles en la sección transversal se producen bajo condiciones de deformación plana, con formación del cuello en la sección, y se lleva a cabo comúnmente en dirección perpendicular a la dirección de la carga. Mientras que por otro lado, alguno de los llamados labios cortantes se forma de la superficie de fractura a la superficie de la pieza. La relación del área de la región de cara plana con el área de labio cortante, generalmente llega a ser más grande de acuerdo a como aumenta el espesor de la pieza.
- Fracturas por tracción de cara cortante en materiales dúctiles se forman bajo condiciones de esfuerzos planos, con o sin adelgazamiento de la sección, y típicamente ocurre en ángulo alrededor de los 45° con respecto a la pieza. La apariencia fina, sedosa, gris y opaca de la fractura, son características de una fractura por tracción con caras de esfuerzo cortante en materiales dúctiles.

4.8.1.- Fractografía de fractura frágil.

El examen de la fractografía de superficies de fracturas dúctiles de superficies planas comúnmente revela hoyuelos equiaxiales, que por lo general presentan evidencias de las partículas que iniciaron la fractura.

Las fracturas inclinadas o dúctiles envuelven componentes de los esfuerzos cortantes, como la torsión, dando lugar a hoyuelos alargados.

La elongación de los hoyuelos producida por el esfuerzo cortante apunta en dirección opuesta a las superficies de fracturas al hacerlas coincidir. Los hoyuelos alargados son también producidos por desgarre. Otra característica que podría ser observada incluye la presencia de clivaje en planos conjugados, planos de clivaje unidos a desgarres dúctiles en diferentes niveles y "lenguas" que resultan de fracturas en planos simétricos formados durante el avance de la grieta.

4.9. – Fracturas frágiles.

Estas se caracterizan por la rápida propagación de la grieta con un bajo gasto de energía y sin una apreciable deformación plástica. Este tipo de fracturas presenta una superficie brillante y granular así como un aspecto de caras planas. El examen microscópico de las fallas frágiles revelaran facetas intergranulares o transgranulares.

Las fracturas intergranulares son superficies de grano que han sido expuestas por la propagación de la grieta a lo largo de los límites del grano, y puede, por lo regular, ser fácilmente reconocida pero la determinación de la causa de fractura puede ser más compleja.

Mientras las fracturas transgranulares observadas en fracturas frágiles, son producidas por clivaje a lo largo de numerosos planos cristalográficos paralelos, creando así una superficie de fractura en forma de terrajas, dando lugar a un patrón de marcas de río.

4.9.1.- Fractografía de fracturas frágiles transgranulares.

En muestras poli-cristalinas se presentan numerosas placas de clivaje, comúnmente, mostrando un alto grado de perfección geométrica.

La característica principal de ésta superficie es la presencia de marcas de río, el cual consiste de etapas de clivaje e indican la dirección en la que crece la grieta.

4.10. – Fallas por fatiga.

La fatiga es el cambio progresivo, localizado y permanente de estructura que ocurre en un material sujeto a deformaciones repetidas o fluctuantes, cuando se aplican esfuerzos que tienen un valor máximo por debajo de la resistencia a la tracción del material. La falla por fatiga podría terminar con la presentación de una grieta o fractura del material después de un cierto número de ciclos y esfuerzos de tracción. Si cualquiera de estos factores no están presentes no se iniciará ni se propagará la fisura, ya que, los esfuerzos cíclicos inician la fisura y los de tracción la hacen crecer, es decir, la propagan.

En los procesos de fatiga se pueden considerar tres etapas:

1. - Daño inicial de la fatiga que conduce a la iniciación de la grieta.
2. - Propagación de la grieta hasta que la sección transversal, que queda sin agrietarse, llega a ser excesivamente débil para soportar la carga.
3. - Final, rompimiento repentino de la sección transversal que se mantenía sin daño.

4.10.1.- Predicción de la vida de fatiga.

En la práctica, predecir la vida de la fatiga de un material es muy difícil ya que a excepción de algunos cuantos materiales frágiles la vida de un material sometido a fatiga es muy sensible a pequeños cambios en las condiciones de carga, a esfuerzos locales y a características locales del material.

4.10.2.- Las curvas “S-N”

Los resultados de las pruebas de fatiga son comúnmente graficados como esfuerzos máximos o amplitud de esfuerzos contra números de ciclos (N) necesarios

para que se presente la fractura, utilizándose para este eje una escala logarítmica; mientras que para el eje de los esfuerzos se puede utilizar tanto una línea o una logarítmica.

La curva que se forma con los puntos formados por los pares de datos se llama curva S - N, como se muestra en la figura 4.9.

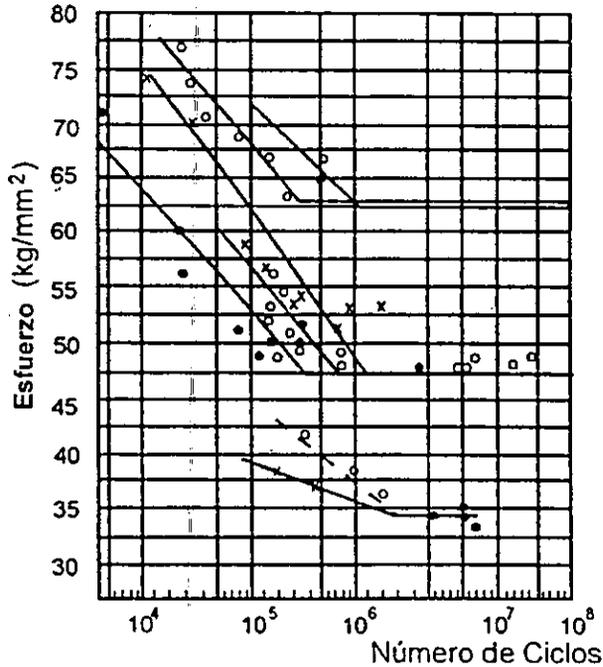


Fig. 4.9. Curvas típicas S-N de diversos metales.

4.10.3.- Límite a la fatiga.

La parte horizontal de una curva S - N representa el máximo esfuerzo al que puede mantenerse un material para un número infinitamente grande de ciclos con una probabilidad del 50% de falla, a esto se le llama el límite a la fatiga.

4.10.4.- Características de la fractura que revela la macroscopia.

El examen de las superficies de fracturas por fatiga empiezan, generalmente, por inspecciones visuales o a bajos aumentos; este exámen emplea técnicas sencillas y pueden ser, frecuentemente, realizada en el mismo lugar donde ocurrió la falla, requiriendo poca o nula preparación de la muestra y equipo muy sencillo, además, de que no se debe destruir la muestra o alterar la estructura de la superficie de fractura. La examinación macroscópica es particularmente útil para correlacionar las características de la superficie de fractura con el tamaño y forma de la pieza, así como, las condiciones de carga.

4.10.5.- Marcas de playa.

Generalmente la característica más representativa de las que son encontradas en las superficies de las fracturas por fatiga son las marcas de playa, que son marcas concéntricas a un punto y este punto corresponde al origen de la grieta por fatiga. Son también llamadas marcas de concha de ostra, marcas acaracoladas; y pueden ocurrir como un resultado de los cambios de carga o de frecuencia o por oxidación de la superficie de fractura durante los periodos que se detiene la grieta.

4.10.6.- Zona de fractura final.

Esta es una zona que de manera frecuente se denota fibrosa en la superficie de la fractura por fatiga, parecido a la superficie de fractura por impacto. El tamaño de esta zona depende de la magnitud de la carga y su forma de dirección, tamaño y geometría de la carga sobre la pieza fracturada. En materiales tenaces de sección redonda o delgada la zona de fractura final consistirá de una fractura en dos distintos modos:

a) Fractura por tracción extendiéndose desde la zona de fatiga y en el mismo plano, y

b) Fractura por cortante a 45° con respecto a la superficie de la pieza que rodea a la fractura por tracción.

Se deben observar las dos características en la zona de fractura final que ayudan a determinar el origen de la misma:

a) La fatiga se origina generalmente en la superficie y de aquí que, el origen de la fractura no este incluido en la fractura del labio de cortante, y

b) La presencia de las características marcas de chevron en las fracturas por tracción, que señalan hacia atrás el origen de la fractura.

4.10.7.- Rasgos característicos de fatiga por microscopía.

La examinación de una fractura por fatiga a través de microscopía con luz visible es difícil algunas veces, debido a la altura de ciertos rasgos en la superficie de fractura que puede llegar a exceder la profundidad del campo del microscopio, especialmente a grandes magnificaciones. En el examen a través del microscopio electrónico de una superficie de fractura por fatiga, la principal característica encontrada es como parches de marcas paralelas finamente espaciadas, llamadas estrías de fatiga.

Por lo regular, una grieta por fatiga se inicia en una región de altos esfuerzos de una pieza que esta sometida a un gran número de esfuerzos cíclicos, posteriormente la fisura se propaga bajo los esfuerzos aplicados a través del material hasta que resulta en una fractura completa. A escala microscópica, la característica más significativa es la nucleación de una o más grietas bajo la influencia de un esfuerzo contrario que excede la resistencia al flujo, seguido por el desarrollo de grietas en persistentes bandas de deslizamiento o en los límites de grano.

Subsecuentemente la propagación de grietas por fatiga por una serie de movimientos de abrir y cerrar en la punta de la grieta que produce, dentro del grano, estriaciones que son paralelas al frente de la grieta.

4.11. Fallas por deformación excesiva.

Cada estructura tiene una carga límite que cuando se excede la convierte en insegura e inconfiable. Las cargas aplicadas que rebasa el límite se denomina sobrecarga y algunas veces dan como resultado la deformación o fractura de uno o más miembros de la estructura. La estimación de los límites de carga es una de las tareas más importantes del diseño y comúnmente se calcula a través de uno de los métodos clásicos ya sea el análisis de diseño o análisis de límite.

Una falla por distorsión ocurre cuando una estructura o componente es deformada, de tal forma que este:

- a) no puede soportar más tiempo la carga para la que fue producido.
- b) es incapaz de desarrollar la función para la que fue fabricado.
- c) interfiere con la operación de otro componente.

Las fallas por distorsión pueden ser tanto plásticas como elásticas y podrían o no ser acompañadas por fractura. Existen dos tipos principales de distorsión:

- a) Distorsión de tamaño, la que se refiere a un cambio en el volumen (crecimiento o reducción).
- b) Distorsión de forma (doblado o torcido), la que se refiere a cambios en la geometría.

4.12. Fallas por desgaste.

El desgaste es un fenómeno superficial que ocurre por desplazamiento y separación del material. Debido a que el desgaste usualmente implica una pérdida

progresiva de peso y la alteración de dimensiones en un periodo de tiempo, el problema del desgaste generalmente difiere de los demás e implica, sin duda, posibles daños por fractura. Aunque es posible que la parte desgastada se cambie por no poder continuar desarrollando su función satisfactoriamente o que la calidad de su función es parcial.

Por lo general el desgaste se define como el daño sufrido por una superficie sólida por la remoción o desplazamiento de material debido a la acción mecánica que se produce al ponerle en contacto con un sólido, líquido o gas. El desgaste es comúnmente dañino, pero en forma suave podría ser benéfico. Cuando se produce falla primordialmente por un tipo de desgaste, el análisis podría ser relativamente fácil, pero en muchos de los casos proviene de la combinación de los diferentes modos o tipos de desgaste. Además, el tipo de desgaste podría cambiar de acuerdo a la forma en la que se vaya progresando desde el principio, haciendo difícil el análisis por estas condiciones.

4.12.1.- Desgaste adhesivo.

También conocido como escoriado, irritación, rasgar y poner aspereza, ésta ocurre cuando dos superficies metálicas se deslizan una con otra bajo presión. Los puntos de contacto, proyecciones microscópicas o la aspereza de la unión en la interfase donde ocurre el deslizamiento por altas presiones localizadas, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando el material de una superficie y transfiriéndolo a la otra, lo que puede provocar posteriormente un mayor daño.

4.12.2.- Desgaste abrasivo

Es el desplazamiento de material de la superficie en contacto por superficies duras en superficies de coincidencia, o con superficies duras, que presentan un movimiento relativo en la superficie desgastada. Cuando es el caso de partículas duras, ellas pueden encontrarse entre las dos superficies que se deslizan o se podrían implantar en cualquiera de las superficies. Es conveniente aclarar que este tipo de desgaste se puede presentar en estado seco o en la presencia de un líquido.

4.12.3.- Desgaste erosivo.

Este tipo es un desgaste abrasivo que presenta pérdidas de material en la superficie por el contacto con un líquido que contiene ciertas partículas, siendo el movimiento relativo entre el fluido y la superficie esencial para este proceso, ya que la fuerza en las partículas, que de hecho son responsables del daño, se aplica cinemáticamente. En el desgaste erosivo es donde el movimiento relativo de las partículas sólidas es casi paralelo con las superficies erosionadas se denomina erosión abrasiva, por otro lado, la erosión en la que el movimiento relativo de las partículas es casi normal (perpendicular) a la superficie erosionada es llamada erosión por impacto.

4.12.4.- Desgaste corrosivo

El desgaste corrosivo es en el cual las reacciones químicas o electroquímicas con el medio ambiente contribuyen significativamente en la velocidad del desgaste. En algunas ocasiones, las reacciones químicas ocurren primero y son seguidas por remociones de los productos de la corrosión mediante acción mecánica (abrasión), de otra manera, la acción mecánica podría preceder a la acción química dando como

resultado la creación de pequeñas partículas de desperdicio, la que luego reaccionará con el medio ambiente.

4.12.5.- Corrosión erosión

Es un tipo de desgaste en el cual hay movimiento relativo entre una superficie y un fluido corrosivo, la velocidad de desgaste está directamente relacionada con la velocidad del fluido, siendo que cuando las partículas abrasivas están presentes, la remoción del material se efectúa principalmente por contacto con las partículas (desgaste por erosión).

Una forma especial de corrosión es conocida como erosión por cavitación y puede ocurrir en una superficie que está en contacto con un líquido que no tiene partículas, en este tipo la repetida formación y choque de burbujas de vapor con la superficie impone un largo y repetitivo contacto con esfuerzos que pueden causar picaduras o descascarar.

4.13. Fallas por rozamiento.

Este es un fenómeno de desgaste que ocurre entre dos superficies que coinciden; es de naturaleza adhesiva y la vibración es su principal factor de causa, además de ser generalmente acompañado por corrosión. Por lo general ocurre entre dos superficies perfectamente juntas y apretadas que son sometidas a movimientos cíclicos relativos de una amplitud extremadamente pequeña.

En los lugares donde comúnmente se da el rozamiento son uniones atomilladas, chavetas, seguros, cerrados a presión, y remaches; en cojinetes oscilantes, cuña, coples, clutches, pernos y sellos, en uniones a presión en ejes, así como, en uniones universales, y artículos de prótesis. Un problema con el rozamiento

es que podría provocar grietas por fatiga, que en ejes u otros componentes sometidos a altos esfuerzos es frecuente concluya en una fractura por fatiga.

4.14. Agrietamiento de corrosión bajo esfuerzo.

El agrietamiento de la corrosión bajo esfuerzo es un proceso de falla mecánica y ambiental en el que se combinan los esfuerzos mecánicos y el ataque químico en la iniciación y propagación de la fractura en una pieza de metal.

En las fallas por agrietamiento de corrosión bajo tensión son frecuentemente provocadas por la exposición a medios ambientes aparentemente suaves, al mismo tiempo que es sometido un esfuerzo de tracción que es menor al esfuerzo de cedencia del material. Bajo estas condiciones fracturas finas pueden penetrar profundamente en la pieza, aunque en la superficie se tenga la apariencia de una insignificante cantidad de corrosión, por lo tanto no podría haber indicaciones macroscópicas de una inminente falla.

4.15. Fluencia lenta o termofluencia (Creep).

La fluencia es el cambio en la dimensión de un metal o aleación a la que se está aplicando un esfuerzo a una temperatura que es mayor que $0.5 T_f$, donde T_f es la temperatura de fusión medida en escala absoluta.

La deformación por fluencia puede producir, claramente, grandes cambios en las dimensiones de un componente, lo que representa no poder seguir empleándolo durante mas tiempo en servicio antes que ocurra la fractura. Por otro lado, la deformación por fluencia podría llevar a la fractura .

Las fallas por fluencia y ruptura por esfuerzo son generalmente fáciles de identificar, con frecuencia, ellos pueden reconocerse por la ductilidad local y la

capacidad de multiplicar las grietas intergranulares que están presentes, además las fallas por esfuerzos de ruptura pueden ser identificadas por inspección óptica de microsecciones ya que, por lo general, existe una gran cantidad de huecos por fluencia alrededor de la fractura principal.

En este capítulo se analizaron los orígenes fundamentales de las fallas, que hacen comprender que el estudio de ellas es fundamental para el éxito de cualquier proyecto en donde este involucrado un material, los conceptos antes descritos son también la base para la prevención de fallas que es el objeto principal de nuestro trabajo.

En el siguiente capítulo se propone un método para que a través de análisis y observaciones sencillos se pueda diagnosticar alguna falla de material y poder prevenirla, para que en el futuro se reduzca la posibilidad de que se repita.

CAPITULO 5

SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EVITAR LA FALLA

5.1 Introducción.

En la selección de materiales para evitar la falla, como se ha visto, se deben tomar en cuenta una gran cantidad de aspectos, de los cuales uno de los principales es saber como inicia la falla y como se puede prevenir, con el uso de herramientas como son la mecánica de las fracturas, la cual permite determinar el nivel de esfuerzo en el que puede fallar el componente, conociendo la tenacidad a la fractura y también la longitud de la grieta; podemos conocer cuando fallará el componente.

En este capítulo se analizara la interacción del material y las condiciones en las cuales se desempeñara el material. Las características a considerar de un material son las siguientes propiedades: la densidad, el modulo de elasticidad, la resistencia, el costo etc. Asimismo se hará la selección del material con y sin considerar la geometría.

También se realizara un análisis cuantitativo de las fallas en el cual se tomara en cuenta la geometría, el estado de esfuerzos, las observaciones fractográficas e información metalúrgica. Al realizar este análisis se conocerá con certeza la causa o causas de la falla para no desviarse del objetivo principal y seleccionar un material contra la falla.

5.2 Mecánica de las fracturas.

Se sabe que el esfuerzo de unión teórico es mucho mayor que el esfuerzo de fractura en los metales. Este indicador da la idea de defectos o grietas el cual concentra el esfuerzo a un nivel de esfuerzos de unión teóricos. Se sabe que las microgrietas pueden ser formadas en sistemas metalúrgicos por una variedad de mecanismos y que

el paso crítico usualmente es el esfuerzo requerido para propagar las microgrietas que completan la fractura. La teoría de Griffith sobre la fractura frágil es lo usual para éstos problemas, el cual fue modificado por Orowan para tener presente el grado de plasticidad en la fractura frágil de los metales, resultando que el esfuerzo de fractura está dado por

$$\sigma_f \cong \frac{E\gamma_p}{a} \dots\dots\dots(1)$$

donde "E" es el modulo de Young, y γ_p es el trabajo plástico requerido para extender la grieta hasta una longitud 2a, donde "a" es la longitud de la grieta.

La ecuación anterior fue modificada por Irwin para reemplazar el valor de γ_p con un término que fue directamente medido.

$$\sigma_f = \frac{E\phi_c^{1/2}}{\pi a} \dots\dots\dots(2)$$

donde ϕ_c corresponde al valor crítico de la fuerza extensión-grieta.

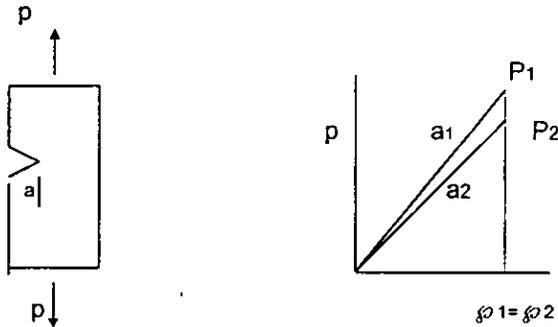
$$\phi = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \dots\dots\dots (3)$$

la fuerza de extensión de la grieta tiene unidades de Jm^{-2} ($= N m^{-1}$), donde ϕ también puede ser considerado como el valor de la energía de deformación liberada. El valor crítico de ϕ el cual hace que la grieta propicie la fractura es llamado tenacidad a la fractura del material ϕ_c . La mecánica de fractura permite determinar si una grieta de longitud dada en una material que se conoce su tenacidad a la fractura puede ser peligroso, y propiciar la fractura a un nivel de esfuerzo dado, también permite la

selección de materiales para la resistencia a la fractura y tomarlos en cuenta para un diseño más confiable.

5.2.1.- Valor de la energía de deformación liberada

En la figura 5.1 se muestra como puede medirse ϕ .



En una gráfica de carga (P) contra elongación (δ) se puede determinar el valor de ϕ . Con una probeta que tiene una ranura aplicando un esfuerzo axial, la ranura maquinada puede simular una grieta por fatiga. El desplazamiento de la grieta es función de la carga P. La fuerza es medida con un extensómetro graduado en la entrada de la ranura. Las curvas de carga contra desplazamiento se determinan con diferentes longitudes de ranura, en donde, $P = M\delta$. M= rigidez de la probeta, con una grieta de longitud a. La energía de la deformación elástica esta dada por el área bajo la curva de un valor particular de P y de δ

$$U_0 = \frac{1}{2} P\delta = \frac{P^2}{2M} \dots\dots\dots(4)$$

considerando el caso de la figura en donde la probeta está sujeta rigidamente y un incremento de la grieta "a" da como resultado la pendiente de las cargas P1 y P2.

$$\delta 1 = \delta 2 = \frac{P_1}{M_1} = \frac{P_2}{M_2}$$

ya que $P/M = \text{constante}$

$$\frac{\partial P}{\partial a} \frac{1}{M} + P \frac{\partial(1/M)}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = -PM \frac{\partial(1/M)}{\partial a} \dots\dots\dots(5)$$

pero la fuerza de extensión de la grieta esta definida como

$$\phi = \frac{\partial U_0}{\partial a} \frac{1}{\delta} = \frac{1}{2} \frac{2P}{M} \frac{\partial P}{\partial a} + P^2 \frac{\partial(1/M)}{\partial a} \dots\dots\dots(6)$$

sustituyendo la ecuación 5 en 6 tenemos que:

$$\phi = -\frac{1}{2} P^2 \frac{\partial(1/M)}{\partial a} \dots\dots\dots(7)$$

El valor de la energía de deformación liberada puede evaluarse de la ecuación 7 por determinados valores de $(1/M)$ siendo una función de la longitud de la grieta. La resistencia a la fractura o el valor crítico de la energía de deformación liberada es determinada por la carga máxima P_{max} . Con lo cual la grieta se extiende inestablemente en la fractura.

5.2.2.-Factor de intensidad de esfuerzo.

El factor de intensidad de esfuerzo es denominado K y es una forma de describir la distribución de esfuerzos alrededor de una grieta. Indica que el esfuerzo local cerca de la grieta depende del producto del esfuerzo nominal σ y la raíz cuadrada de la longitud media. El factor de intensidad de esfuerzo K en una grieta con comportamiento elástico en un lado de una lámina infinita es definido como:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots(8)$$

Si dos grietas de diferente geometría tienen el mismo valor de K, los campos de esfuerzo alrededor de las grietas son idénticos. El valor de K para muchas grietas y muchos tipos de carga pueden calcularse con la teoría de elasticidad. Para casos en general el factor de intensidad de esfuerzos esta dado por:

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots(9)$$

donde α es un parámetro que depende de la probeta y la geometría de la grieta. Nótese que K tiene unas dimensiones inusuales como son MNm^{3/2} ó MPam^{1/2}.

Al igual que la fuerza ϕ sobre la grieta, el factor K tiene un significado físico directo para el proceso de fractura, por lo que se usa en la determinación analítica de la mecánica de las fracturas. Al combinar las ecuaciones 3 y 9 resulta que los dos parámetros están relacionados.

$$K^2 = \phi E \quad \text{Condición de esfuerzos plana} \dots\dots\dots(10)$$

$$K^2 = \phi E / (1 - \nu^2) \quad \text{Condición de deformación plana} \dots\dots\dots(11)$$

5.2.3.-Diseño y resistencia a la fractura.

El valor de K_{Ic} representa la resistencia a la fractura del material siendo independiente de la longitud y la geometría de la grieta o del sistema de carga. K_{Ic} es una propiedad del material al igual que la resistencia a la cedencia. La ecuación básica para la resistencia a la fractura muestra un equilibrio en el diseño que es inherente en el diseño de la mecánica de las fracturas.

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots(12)$$

Al seleccionar el material, K_{Ic} está determinado. Si se tiene en cuenta el aspecto de la grieta el esfuerzo se puede determinar y debe ser menor que el valor K_{Ic} . Por otra parte si el sistema requiere de alta resistencia y bajo peso, K_{Ic} se determina con el límite del material con baja densidad y alta resistencia a la fractura teniendo en cuenta la máxima capacidad de carga. Por lo que la baja resistencia admisible se determina con teorías de inspección, esto se encuentra con la resistencia a la fractura, esfuerzo admisible y dimensión de la grieta.

5.2.4.- K_{Ic} Criterio de la tenacidad en deformación plana.

Aquí consideraremos los procedimientos de prueba con el cual la mecánica de fractura puede ser utilizada para tener una medida significativa de las propiedades del material. Ya que los métodos de análisis están basados en una elasticidad lineal de la mecánica de fracturas, estas pruebas están restringidas para materiales con un límite de ductilidad. Los materiales típicos que tienen alta resistencia son: acero, titanio y aleaciones de aluminio.

Sabemos que el campo de esfuerzos elásticos cerca de un borde de la grieta se describe por el parámetro llamado factor de intensidad de esfuerzo K, por lo que su magnitud depende de la geometría del sólido que contiene la grieta, la dimensión y localización de la grieta, la magnitud y la distribución de las cargas en el sólido. Sabemos que el criterio para fractura frágil en presencia de un defecto o grieta es rápidamente inestable y puede ocurrir la falla cuando el esfuerzo excede el valor crítico sobre el borde de la grieta. Puesto que el esfuerzo en el borde de la grieta se describe por el factor K, se puede usar un valor crítico de K para definir las condiciones en la falla frágil. K_{Ic} se considera una propiedad del material al igual que la resistencia inherente del material para la falla en la presencia de grietas.

Para una carga dada y una relación geométrica se tiene:

$$K_{Ic} = \alpha \sigma \sqrt{\pi a_c} \dots\dots\dots(13)$$

en donde α es un parámetro que depende de la probeta y la geometría de la grieta y a_c es la longitud crítica de la grieta. Si se conoce K_{Ic} se puede obtener un esfuerzo máximo admisible para una dimensión de grieta dada. K_{Ic} es una propiedad básica del material que puede variar con parámetros importantes como son la temperatura y el estado de deformación. Para aleaciones dadas K_{Ic} depende fuertemente de variables metalúrgicas, como tratamiento térmico, la textura, impurezas, inclusiones etc.

La medición de la tenacidad a la fractura bajo condiciones en el plano de esfuerzos es obtenida bajo fuerzas máximas o fragilidad en materiales. La resistencia a la fractura en el plano de deformación se indica como K_{Ic} , es donde el esfuerzo a la

fractura varía con probetas de espesor B. Una vez que la probeta tiene un espesor crítico para la resistencia del material, la fractura superficial resulta plana y el esfuerzo de fractura es constante, y esto se observa variando el espesor de la probeta. El mínimo espesor para obtener condiciones de deformación plana y un valor válido de K_{Ic} es:

$$B = 2.5 \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_o}$$

donde σ_o es el esfuerzo de cedencia a una deformación de 0.2 %

Una variedad de probetas se han propuesto para medir K_{Ic} y la tenacidad a la fractura de la deformación plana. Hay tres probetas que representan los diseños más comunes de probetas. La probeta a tensión compacta y los tres puntos de carga en la probeta de impacto se han estandarizado por las normas ASTM.

Las probetas se muestran en la figura 5.2 a:

Hay tres tipos de curvas que se obtienen de los materiales, las curvas son de carga - desplazamiento de la ranura. Y se muestran en la figura 5.2 b

En el tipo I, la curva de desplazamiento-carga representa el comportamiento de un metal dúctil en el cual la propagación de la grieta da la ruptura con la carga creciente. Esta curva no contiene las características medibles para indicar la carga en el momento que se fractura. En las normas ASTM indica que la línea secante O- P_s del origen, con una medición es de 5% menos que la tangente OA. Esto determina P_s . La siguiente línea horizontal es la carga igual al 80% de P_s , y midiendo la distancia X_1 a lo largo de la tangente OA a la curva actual nos indica que: si X_1 excede un cuarto de la

línea correspondiente a la distancia X_s el material es muy dúctil para obtener un valor válido de K_{Ic} .

El tipo II de la curva tiene un punto en donde hay una pendiente cortante en la carga pero después se recupera con la carga. La pendiente en la carga representa un disparo elevándose inestablemente la propagación de la grieta.

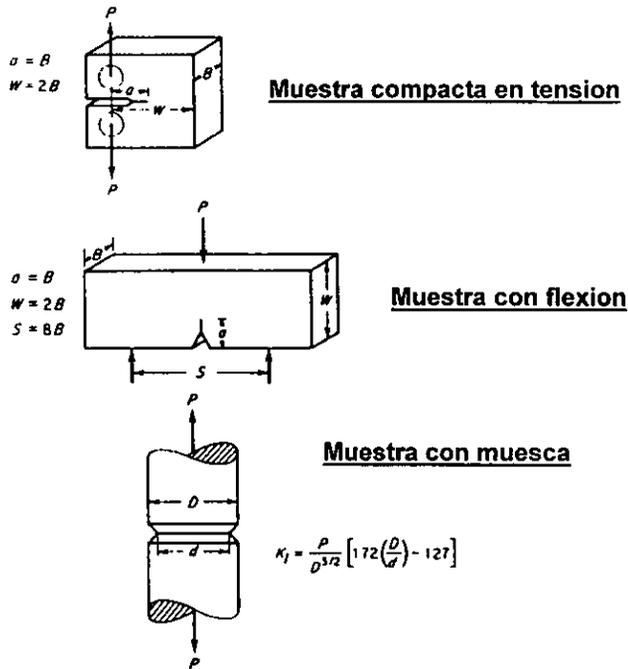


Figura 5.2.a.- Muestras comunes para medir K_{Ic}

El mismo criterio del material dúctil se aplica para la curva del tipo II, siendo el caso de que P_0 es la carga máxima.

En la curva del tipo III se observa un completo disparo inestable en donde la grieta inicial se propaga rápidamente para completar la falla. Este tipo de curva es característico de los materiales frágiles.

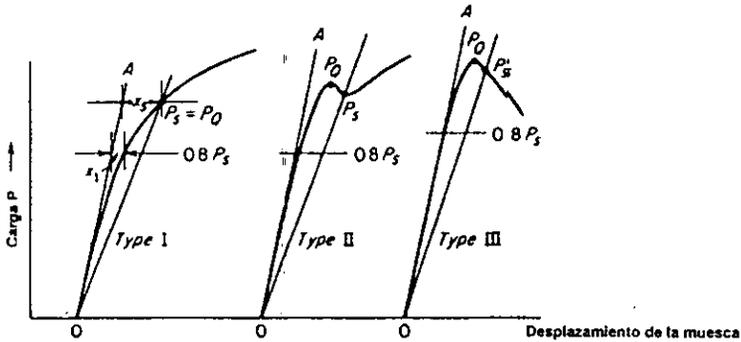


Fig. 5.2.b.- Curvas de carga contra desplazamiento (la pendiente OP se exagera para mayor claridad)

5.2.5.-Tablas de valores de K_{Ic} .

El uso de las tablas de valores de K_{Ic} puede prevenir la falla, es decir, que teniendo el valor del esfuerzo de cedencia y el valor de K_{Ic} tomado de las tablas se puede obtener el valor del tamaño de la grieta y con ello determinar el modo de falla, siendo este un aspecto muy importante en la selección de materiales contra la falla.

Valores típicos de K_{Ic}

(Tabla 5.1.- Propiedades de resistencia en placas con espesor de una pulgada a temperatura ambiente)

Material	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Tenacidad a la Fractura K_{Ic} (MPa m ^{1/2})
Acero 4340	1470	46
Acero D6AC	1730	90
Titanio 6Al- 4V	900	57
2024-T3	385	26
7075-T6	500	24

Tabla 5.2.-Tenacidad Gc y Tenacidad a la Fractura, Kc

Material	Gc/kJm ²	Kc /MNm ^{-3/2}
Metales dúctiles puros (Cu, Ni, Ag, Al)	100- 1000	100- 350
Rotor de acero(A533)	220- 240	204- 214
Acero para recipientes a presión 150 (HY130)		170
Acero de alta resistencia(HSS)	15- 118	50- 154
Acero suave	100	140
Aleaciones de Titanio(Ti6Al4V)	26- 114	55- 115
GFRPs	10- 100	20- 60
Fibra de vidrio(F.V. epóxica)	40- 100	42- 60
Aleaciones de Aluminio (alta-baja resistencia)	8-30	23- 45
CFRPs	5-30	32- 45
Maderas comunes, grieta ⊥ al grano	8- 20	11- 13

Material	Gc / KJ m ²	Kc / MN m ^{-3/2}
Boro- fibra epoxica	17	46
Acero de medio carbono	13	51
Polipropileno	8	3
Polietileno (baja densidad)	6- 7	1
Polietileno (alta densidad)	6- 7	2
Poliestireno ABS	5	4
Nylón	2- 4	3
Acero- cemento reforzado	0.2- 4	10- 15
Hierro fundido	0.2- 3	6- 20
Poliestireno	2	2
Maderas comunes, grieta // al grano	0.5- 2	0.5- 1
Policarbonato	0.4- 1	1- 2.6
Cobalto/Tungsteno	0.3- 0.5	14- 16
PMMA	0.3- 0.4	0.9- 1.4
Epoxicos	0.1- 0.3	0.3- 0.5
Granito (Granito occidental)	0.1	3
Poliester	0.1	0.5
Nitruro de Silice Si3N4	0.1	4- 5
Berilio	0.08	4
Carburo de Silice SiC	0.05	3
Magnesia MgO	0.04	3
Cemento/concreto	0.03	0.2
Calcita (marmol, piedra caliza)	0.02	0.9
Alúmina, Al2 O3	0.02	3- 5
Pizarra (oilshale)	0.02	0.6
Vidrio para refrescos	0.01	0.7- 0.8
Porcelana electrica	0.01	1

Una vez conocido K_{ic} , el esfuerzo y la grieta se podrán utilizar las tablas de índices de desempeño.

A continuación se proporciona el procedimiento para obtener los índices de desempeño así como sus respectivas tablas las cuales nos sirven para complementarse con las cartas del capítulo 5.3. Los índices de desempeño se obtienen básicamente para minimizar el peso del componente. A continuación se menciona el procedimiento:

- 1.- Identificar el atributo a ser maximizado o minimizado (peso, costo, energía, rigidez, resistencia, seguridad, etc.).
- 2.- Desarrollar una ecuación para estos atributos en términos de los requerimientos de funcionalidad.
- 3.- Identificar las variables sin restricciones.
- 4.- Identificar las variables con restricciones y ponderarlas.
- 5.- Desarrollar las ecuaciones para las variables con restricciones.
- 6.- Separar las variables sin restricciones de las variables con restricciones.
- 7.- Existen tres grupos de variables y son: requerimientos funcionales, geometrías y propiedades del material.

Tabla 5.3.a.-INDICES DE DESEMPEÑO DISEÑO DE PESO MINIMO, COSTO Y ENERGIA

FORMA DEL COMPONENTE Y CARGA	RIGIDEZ EN EL DISEÑO MAXIMIZADO	RESISTENCIA EN EL DISEÑO MAXIMIZADO
TIRANTE (PUNTAL DE TENSION) CARGA, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	E / ρ	$\sigma t / \rho$
TORSION BARRA O TUBO TORQUE, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	G^h / ρ	$\sigma t^{2/3} / \rho$
VIGA CARGADA EXTERNAMENTE O DOBLADO POR SU PROPIO PESO, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	E^h / ρ	$\sigma t^{2/3} / \rho$
COLUMNA (PUNTAL DE COMPRESION) FALLA POR PANDEO ELASTICO O COMPRESION PLASTICA; CARGA APLASTANTE Y LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	E^h / ρ	$\sigma t / \rho$
PLACA CARGADA EXTERNAMENTE O DOBLADO POR SU PROPIO PESO, RIGIDEZ, LONGITUD, ANCHO ESPECIFICO, ESPESOR LIBRE	$E^{1/3} / \rho$	$\sigma t^h / \rho$
PLACA CARGADO EN PLANO; FALLA POR PANDEO ELASTICO O COMPRESION ELASTICA, CARGA APLASTANTE, LARGO Y ANCHO ESPECIFICO, ESPESOR LIBRE	$E^{1/3} / \rho$	$\sigma t / \rho$
DISCOS GIRATORIOS, HELICES ENERGIA ALMACENADA ESPECIFICA	-----	$\sigma t / \rho$
CILINDRO CON PRESION INTERNA DISTORSION ELASTICA, PRESION Y RADIO ESPECIFICO, ESPESOR DE LA PARED LIBRE	E / ρ	$\sigma t / \rho$
CUERPOS ESFERICOS CON PRESION INTERNA DISTORSION ELASTICA, PRESION Y RADIO ESPECIFICOS, ESPESOR DE LA PARED LIBRE	$E / (1-\nu) \rho$	$\sigma t / \rho$

Notas:

1).-Para minimizar el costo, use el siguiente criterio para el peso minimo, remplazando la densidad "ρ" por "Cρ", donde "C" es el costo por kilogramo. Para minimizar la energia contenida, use el siguiente criterio para peso minimo remplazando la densidad "ρ" por "qρ" donde "q" es la energia contenida por kilogramo.

2).- "E" = modulo de Young; "G" = modulo de esfuerzo; "ρ" = densidad "σ t" = esfuerzo de cedencia.

Tabla 5.3.b.-INDICES DE DESEMPEÑO DISEÑO DE PESO MINIMO, COSTO Y ENERGIA

FORMA DEL COMPONENTE Y CARGA	LONGITUD FIJA DE LA GRIETA MAXIMIZADO	LONGITUD MINIMA DE LA GRIETA MAXIMIZADO
TIRANTE (PUNTAL DE TENSION) CARGA, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	K_{Ic} / ρ	$K_{Ic}^{4/3} / \rho$
TORSION BARRA O TUBO TORQUE, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	$K_{Ic}^{2/3} / \rho$	$K_{Ic}^{4/3} / \rho$
VIGA CARGADA EXTERNAMENTE O DOBLADO POR SU PROPIO PESO, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	$K_{Ic}^{2/3} / \rho$	$K_{Ic}^{4/3} / \rho$
COLUMNA (PUNTAL DE COMPRESION) FALLA POR PANDEO ELASTICO O COMPRESION PLASTICA; CARGA APLASTANTE Y LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	$K_{Ic}^{2/3} / \rho$	$K_{Ic}^{4/3} / \rho$
PLACA CARGADA EXTERNAMENTE O DOBLADO POR SU PROPIO PESO, RIGIDEZ, LONGITUD, ANCHO ESPECIFICO, ESPESOR LIBRE	$K_{Ic}^{1/2} / \rho$	$K_{Ic}^{2/3} / \rho$
PLACA CARGADO EN PLANO EN TENSION; CARGA APLASTANTE, LARGO Y ANCHO ESPECIFICO, ESPESOR LIBRE	K_{Ic} / ρ	K^2_{Ic} / ρ
DISCOS GIRATORIOS, HELICES ENERGIA ALMACENADA ESPECIFICA	K_{Ic} / ρ	K_{Ic} / ρ
CILINDRO CON PRESION INTERNA DISTORSION ELASTICA, PRESION Y RADIO ESPECIFICO, ESPESOR DE LA PARED LIBRE	K_{Ic} / ρ	K^2_{Ic} / ρ
CUERPOS ESFERICOS CON PRESION INTERNA DISTORSION ELASTICA, PRESION Y RADIO ESPECIFICOS, ESPESOR DE LA PARED LIBRE	$K_{Ic} / (1-\nu)\rho$	$K^2_{Ic} / (1-\nu)\rho$

Notas:

1).-Para minimizar el costo, use el siguiente criterio para el peso minimo, reemplazando la densidad "ρ" por "Cρ", donde "C" es el costo por kilogramo. Para minimizar la energia contenida, use el siguiente criterio para peso minimo reemplazando la densidad "ρ" por "qρ" donde "q" es la energia contenida por kilogramo.

2).- " K_{Ic} " = tenacidad a la fractura " ρ " = densidad

Tabla 5.3.c.-INDICES DE DESEMPEÑO DISEÑO ELASTICO

COMPONENTE Y METAS DEL DISEÑO	MAXIMIZADO
RESORTES ENERGIA ESPECIFICA ALMACENADA, VOLUMEN QUE SERA MINIMIZADO	σ_r^2 / E
RESORTES ENERGIA ESPECIFICA ALMACENADA, MASA QUE SERA MINIMIZADO	$\sigma_r^2 / E\rho$
BISAGRAS ELASTICAS RADIO DEL DOBLEZ A SER MINIMIZADO	σ_f / E
SOPORTES, PIVOTES AREA MINIMA DE CONTACTO, CARGA MAXIMA EN EL APOYO	$\sigma_r^3 / E^2 \text{ y } E$
SELLOS DE COMPRESION Y JUNTAS MAXIMA AREA DE CONTACTO CON MAXIMO CONTACTO DE PRESION ESPECIFICA.	$\sigma_f / E \text{ y } 1 / \sigma_f$
DIAFRAGMAS MAXIMA DEFLEXION BAJO PRESION O FUERZA ESPECIFICA	$\sigma_r^{3/2} / E$
TRANSMISION ROTATORIA, CENTRIFUGA MAXIMA VELOCIDAD ANGULAR, RADIO ESPECIFICO, ANCHO DE LA PARED LIBRE	σ / ρ
TIRANTES, COLUMNAS FRECUENCIA DE LA MAXIMA VIBRACION LONGITUDINAL	E / ρ
VIGAS FRECUENCIA DE LA MAXIMA VIBRACION DE FLEXION	$E^{3/4} / \rho$
PLACAS FRECUENCIA DE LA MAXIMA VIBRACION DE FLEXION	$E^{1/3} / \rho$
TIRANTES, COLUMNAS, VIGAS, PLACAS MAXIMO AUTOAMORTIGUAMIENTO	η

Notas:

1).- " σ " = esfuerzo de cedencia, " ρ " = densidad, "E" = modulo de Young, " η " = coeficiente de perdida.

Tabla 5.3.d.-INDICES DE DESEMPEÑO DISEÑO TOLERANTE DE DAÑOS

COMPONENTE Y METAS DEL DISEÑO	MAXIMIZADO
ELEMENTO DE TENSION DISEÑO DE CARGA CONTROLADA	$K_{Ic} \text{ y } \sigma_f$
ELEMENTO DE TENSION DISEÑO DE DESPLAZAMIENTO CONTROLADO	$K_{Ic} / E \text{ y } \sigma_f / E$
ELEMENTO DE TENSION DISEÑO DE ENERGIA CONTROLADA	K_{Ic}^2 / E
PRESION EN RECIPIENTES RENDIMIENTO ANTES DE LA RUPTURA	K_{Ic} / σ_f
PRESION EN RECIPIENTES ESCAPE ANTES DE LA RUPTURA	K_{Ic}^2 / σ_f

Notas:

1).- " σ_f " = resistencia a la falla, "E" = modulo de Young, "K_{Ic}" = tenacidad a la fractura

Tabla 5.3.e.-INDICES DE DESEMPEÑO DISEÑO TERMICO

COMPONENTE Y METAS DEL DISEÑO	MAXIMIZADO
AISLAMIENTO TERMICO ESPESOR ESPECIFICO, MINIMO FLUJO CALIENTE EN ESTADO CONTINUO	$1 / \lambda$
AISLAMIENTO TERMICO ESPESOR ESPECIFICO, MINIMA TEMPERATURA DESPUES DEL TIEMPO ESPECIFICO	$1 / a = C_p \rho / \lambda$
AISLAMIENTO TERMICO MINIMA ENERGIA DISIPADA EN EL CICLO TERMICO	$a^h / \lambda = 1 / (\lambda C_p \rho)^{1/2}$
ALMACENAMIENTO TERMICO ENERGIA ALMACENADA MAXIMIZADA POR TEMPERATURA Y TIEMPO	$\lambda / a^h = (\lambda C_p \rho)^h$
COMPONENTES DE PRECISION MINIMA DISTORSION TERMICA	λ / α
RESISTENCIA AL CHOQUE TERMICO	$\sigma_f / E\alpha$

Notas:

1).- " σ_f " = resistencia a la falla, "E" = modulo de Young, " ρ " = densidad; " λ " = conductividad termica; " a " = difusion termica; "C_p" = capacidad del calor especifico; " α " = coeficiente de expansion termica

5.3.- Selección de materiales sin tomar en cuenta la geometría.

Todo diseño se compone de un cierto número de propiedades, estas propiedades generalmente se refieren a una baja densidad, un alto módulo de elasticidad y dureza y un costo modesto. El problema es que al identificar el perfil con las características deseadas y lo comparamos con los materiales de ingeniería que existen en el mercado encontramos una gran diferencia y el reto que se tiene enfrente es el de conciliar estos dos parámetros.

Por ejemplo el diseño mecánico involucra la selección de un perfil así como de un material. Algunas veces las dos características se cubren, la mejor selección de un material depende de la forma en que este material este disponible. En este subtema se desarrollara la herramienta para la selección del material cuando esta selección es independiente de su perfil o forma, ya que esto es muy frecuente.

Primero se obtendrá toda la lista de materiales que puede haber en el mercado para nuestro diseño, después se analizan las restricciones primarias que indica el diseño y entonces buscando del subgrupo de materiales restante ver cuales maximizan el desempeño del componente.

Las restricciones primarias son impuestas por las características del diseño las cuales no podemos ignorar ni menospreciar, en algunos diseños la temperatura debe mantenerse, o considerar el medio ambiente en el cual se desempeña, o si debe ser conductor de la electricidad, o aislante. Si estas características son especificadas como obligatorias, debemos de respetarlas y los materiales que en primera instancia, no satisfacen estas constantes deben de ser eliminadas

Las características de algún material obliga a restringir de alguna manera el diseño, debiendo de respetar o tratar de adecuarnos a estas limitantes, la temperatura es un ejemplo claro de lo que estamos diciendo, si se necesita elevar la temperatura de un componente hasta 300 °C es claro que no puede estar compuesto por un polímero ya que todos los polímeros pierden su resistencia en esas temperaturas. La conductividad eléctrica es otro ejemplo debido a que los componentes que deben ser aislados no pueden ser hechos de metal porque todos los metales son buenos conductores. El costo puede ser otro, el costo que resulta de construir con cerámicos no los hace muy interesantes en muchas aplicaciones.

Otras muchas características como la resistencia a la corrosión, módulos, fuerza y densidad pueden aparecer como restricciones primarias, las cuales tienen la forma siguiente:

$$P > P_{\text{crítica}}$$

o también

$$P < P_{\text{crítica}}$$

Donde P es una característica y P crítica es un valor crítico de dicha característica, dado por el diseño, que podría ser excedido, o en el caso del costo o la resistencia a la corrosión, disminuido.

Las restricciones primarias aparecen como líneas horizontales o verticales en las cartas de selección de materiales. En la carta mostrada en la figura 5.3.a. tenemos como ejemplo la constante.

$$E > 10 \text{ Gpa}$$

que es el Módulo de Young con un valor igual o mayor a 10 Gpa el cual se grafica como una línea horizontal, y la densidad, con un valor igual o menor de 3 Mg / m³

$$\rho < 3 \text{ Mg/m}^3$$

En la gráfica se muestra con una línea vertical.

Para el ejemplo, los materiales óptimos que cumplen esta primera restricción se encuentra en el cuadrante superior izquierdo de la carta de selección de materiales, o sea arriba de la línea del modulo de Young y a la izquierda de la línea de la densidad.

Se debe comprender que las características también se pueden manipular a nuestra conveniencia de manera que si tenemos problemas con las características de alguno de ellas podemos actuar modificándolo con sistemas opcionales que actúen de forma paralela, por ejemplo un componente que puede ser muy caliente puede ser enfriado; un componente que no es lo suficientemente denso puede aumentar su densidad por el cambio de forma de esa sección; Uno que se corroe puede ser cubierto por una capa protectora, lo cual nos ayuda a que este análisis no sea tan estricto.

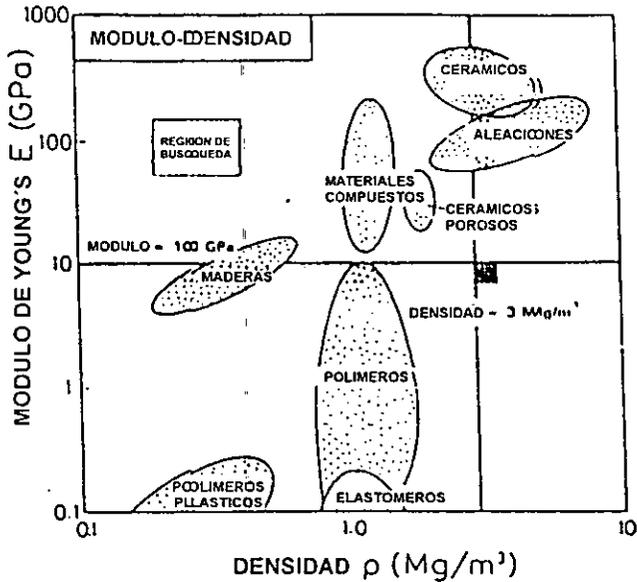


Figura 5.3.a.-Carta esquemática que muestra las constantes primarias.

5.3.1.-Criterio de desempeño maximizado

Dentro del proceso de selección de materiales el siguiente paso es que del subgrupo de materiales seleccionados ver cuales satisficieron las obligaciones primarias, y de estos cuales pueden maximizar el desempeño del componente, para este ejemplo se continuara usando las mismas restricciones densidad y módulo de Young.

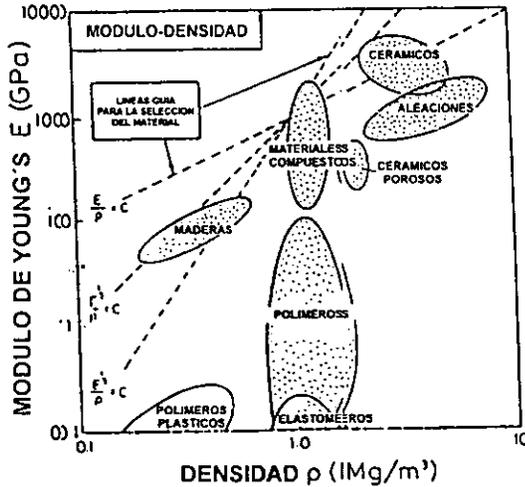


Figura 5.3.b.-Carta esquemática que muestra las líneas guías para los tres índices de desempeño por dureza.

La Carta de la figura No.5.3.b. muestra nuestra misma gráfica con el módulo E, y la densidad pero ahora en escala logarítmica. La condición

$$E / \rho = C$$

o tomando logaritmos

$$\log E = \log \rho + \log c$$

es una familia de líneas paralelas de inclinación 1, donde se tiene una línea por cada valor de la constante c.

La condición

$$E^{1/2} / \rho = C$$

Tiene esta vez un grupo de líneas con una inclinación de 2; y

$$E^{1/3} / \rho = C$$

Tiene otro grupo de líneas con una inclinación de 3.

A estas líneas las llamaremos líneas guías de diseño, que son las que proporcionan la inclinación de la familia de líneas paralelas que pertenecen a ese índice.

En esta gráfica se observa que del subgrupo de materiales en el cual encontramos las constantes restrictivas por cada geometría completa todos los materiales que se posicionan en la parte superior de la línea de la constante $E^{1/2} / \rho$ son los mejores y los de abajo son los no recomendables.

La Carta de la figura No.5.3.c. muestra la misma gráfica pero ahora con un enrejado de líneas correspondientes a los valores de

$$M = E^{1/2} / \rho \text{ de } 1 \text{ a } 8 \text{ GPa}^{1/2} / \text{Mg/m.}$$

Un material con $M = 4$ da una columna que tiene la mitad del peso que una con

$M = 2$. Una con $M = 8$ pesa un cuarto de la misma $M = 2$.

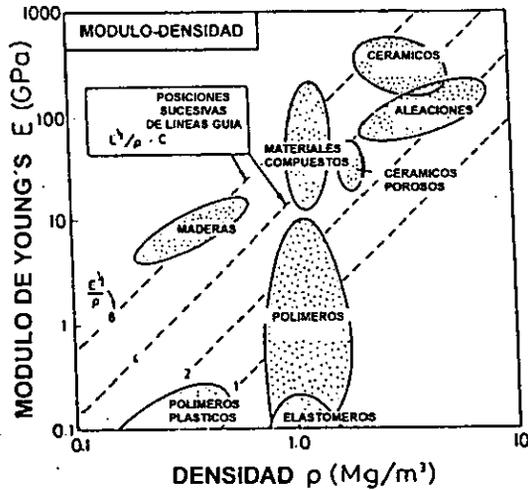


Figura 5.3.c.-Carta esquemática mostrando una zona de líneas para el índice $M = E^{1/2} / \rho$ las unidades son (G Pa) / (Mg / m).

El subgrupo de materiales el cual particularmente tiene el mejor valor del índice es identificado por tener una línea la cual tiene una pequeña región que contiene un pequeño número de candidatos que se muestran esquemáticamente en la Carta de la figura No. 5.3.d.

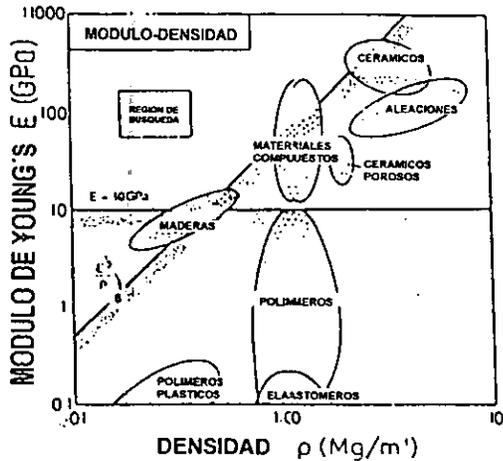


Figura 5.3.d.-Una selección basada en el índice $M = E^{1/2} / \rho$ junto con la constante primaria $E > 10$ Gpa. La banda sombreada con una pendiente de 2 ha sido posicionada en el subgrupo de materiales con $E^{1/2} / \rho$ o sea la línea horizontal con $E = 10$ Gpa. Los materiales contenidos en la región intersectada son los candidatos del siguiente paso en la selección del proceso.

5.3.2.-Restricciones multiples.

Cuando la selección de materiales involucra mas de una restricción, aumenta también la complejidad para poderlo seleccionar, ya que en cualquier diseño se puede minimizar el peso, pero también debemos cuidar la fuerza y la dureza del material.

Una manera rápida para atacar el problema es usando el sentido común para clasificar las restricciones colocando el más importante primero, para eliminar las variables libres ignorando por un momento las restricciones restantes.

Se identifica el Índice de desempeño y usando la carta apropiada, reconocemos el grupo de materiales que pueden ser maximizados, este grupo debe ser lo suficientemente grande para permitir que las restricciones restantes puedan ser aplicadas, y si aun así no hay candidatos que satisfagan las restricciones restantes este grupo de materiales debe aumentarse lo más que se pueda.

Las restricciones restantes eliminan las variables libres de un segundo y si es necesario de un tercer índice. La carta de la figura 5.3.e. ilustra un sector iluminado arriba de las dos líneas que contiene el subgrupo de materiales que satisfacen simultáneamente los dos criterios. Posteriormente se tabulan los componentes del primer subgrupo y se clasifican usando un enrejado de valores de índice de desempeño como los mostrados en la carta No. 5.3.d.

Se usa el segundo índice con la carta apropiada para identificar un segundo subgrupo de materiales, los miembros comunes de los dos subgrupos se identifican y clasifican de acuerdo a esos sucesos de maximización de 2 índices. El procedimiento puede repetirse y frecuentemente es necesario prevenir que los subgrupos no resulten muy pequeños.

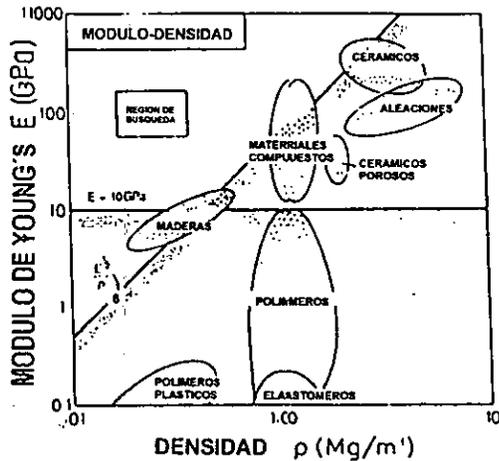


Figura 5.3.e.- El diseño sobrerestringido de 2 o más índices de desempeño enlazado por una ecuación de acoplamiento. Las líneas diagonales punteadas muestran la ecuación para varios valores de la constante de acoplamiento. La segunda línea seleccionada debe de intersectarse en la correspondiente línea de acoplamiento.

El hacer juicios es una parte de la selección de materiales, pero cualquier diseño real es suficientemente complejo por lo que siempre es necesario una gran habilidad para resolver estos problemas, sin embargo los juicios difieren mucho de la forma de pensar de otra persona por lo que pueden ser erróneos o no concordar con lo que piensen los demás.

5.4 Selección de materiales tomando en cuenta la geometría.

En esta sección se dan los conceptos de índices de función para incluir la geometría. Su importancia es de apoyarse con la selección de materiales y los diseños mecánicos.

Entendiendo que la forma de la sección transversal es una variable, por lo que la eficiencia mecánica muchas veces se obtiene por la combinación del material con la geometría, el cual un nuevo término (el factor de forma) aparece en la fórmula para los índices.

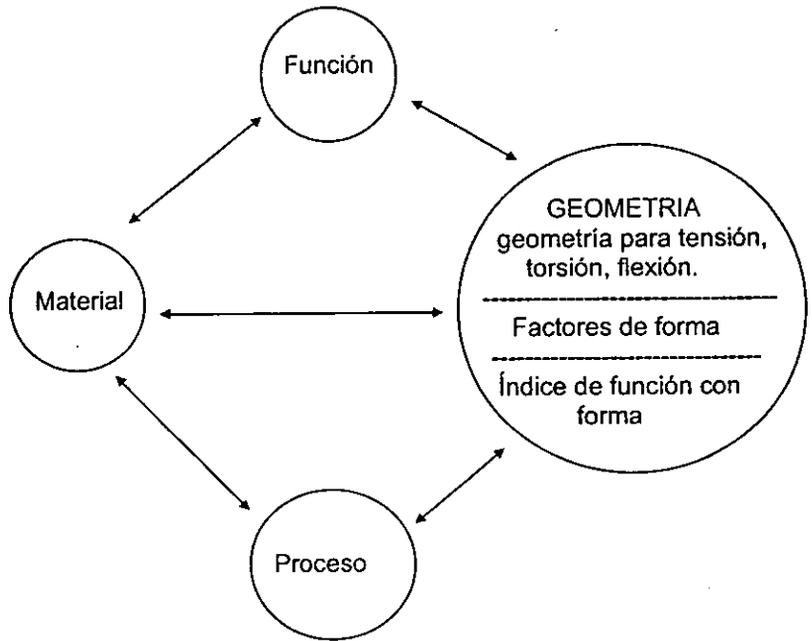


Figura 5.4.- Esquema de la relación de la geometría con el perfil del material.

La figura anterior (5.4.) muestra que el factor de forma es importante para ciertos modelos de carga. Cuando la forma varía es un nuevo término, el factor de forma, el

cual aparece en algunos índices de funcionalidad, ello permite una óptima selección del material y de la forma.

La carga en un componente generalmente es axial, de flexión o de torsión: transmitiendo cargas axiales de tensión en uniones, transmitiendo momentos de flexión en las vigas, transmitiendo torques en los ejes, transmitiendo cargas axiales de compresión en las columnas, etc. (Fig. 5.5). Lo importante es ver que hay una mejor combinación del material y la geometría dependiendo del tipo de carga aplicada el cual define un factor de forma (ϕ) para cada modelo de carga. El factor de forma es adimensional, es decir depende de la geometría pero no de la escala, es un modo de medir la eficiencia estructural de la forma de la sección transversal.

5.4.1.-Factores de forma.

Se sabe que un material tiene muchas propiedades, pero eso no incluye la geometría; un componente o una estructura es un material que tiene geometría. Un factor de forma es un número adimensional el cual caracteriza la eficiencia de una forma de sección transversal, sin tomar en cuenta la escala, en un modelo de carga dado.

Siendo entonces, los factores de forma en la zona de elasticidad los siguientes: ϕ_B^e para la flexión elástica de vigas, y ϕ_T^e para la torsión elástica de ejes.

Para la zona de falla los factores de forma son los siguientes: ϕ_B^f y ϕ_T^f .

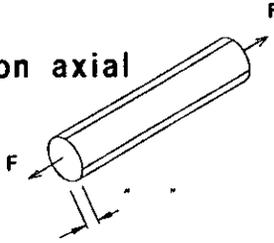
- Extensión elástica. La extensión elástica bajo una carga dada de tensión depende del área de su sección, pero no de su geometría. El factor de forma no es necesario.

- Flexión y torsión elástica. En la flexión elástica de vigas, la forma entra a través del segundo momento de área, I , sobre el eje de flexión (el eje X)

a) Tension axial



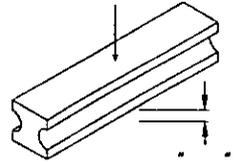
Area "A"



b) Flexion



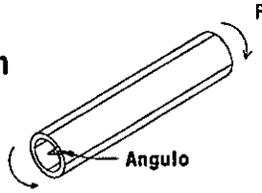
Area "A"
Momento



c) Torsion



Area "A"
Momento Polar



a) Carga axial



Area "A"
Momento

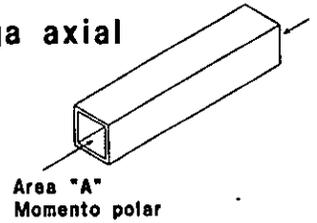


Figura 5.6. Modos comunes de carga, a) tension axial, b) flexion c) torsion, d) compresion axial

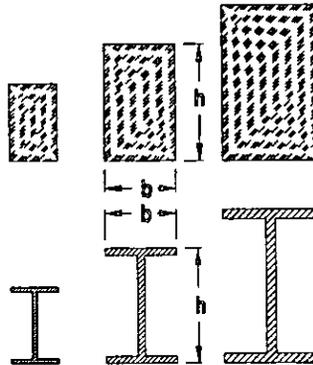


Figura 5.7. Un grupo de secciones rectangulares con $b = 2$ y un grupo de secciones I con $h = 10$. Miembros de un grupo difieren en tamaño pero no en forma.

$$I_{xx} = \int \text{sección } y^2 dA \dots \dots \dots (1)$$

En donde "y" es la medida normal para la flexión axial y dA es el elemento diferencial de área respecto a y. Los valores para I y para el área A de secciones comunes se encuentran en la tabla de momentos de sección. Entonces el primer factor de forma esta definido por:

$$\phi_B^e = \frac{4\pi I}{A^2} \dots \dots \dots (2)$$

Depende solo de la geometría y no del tamaño siendo sus formas de sección las mismas (Figura. 5.6). El factor de forma ϕ_B^e para formas comunes se calcula de la expresión A e I de la tabla mencionada y se enlistan en la primera columna de la tabla de factores de forma. Las geometrías que pueden resistir buena flexión pueden no ser buenas para torsión. En la torsión elástica de ejes, la geometría entra a través del momento torsional del área, K. Para secciones circulares se tiene el momento polar de área, J:

$$J = \int \text{sección } r^2 dA \dots \dots \dots (3)$$

En donde dA es el elemento diferencial de área con respecto a la distancia radial r, medida desde el centro de la sección. Para las secciones no circulares, K es menor que J. Esto se define igual que el ángulo de torsión θ se relaciona con el par T por:

$$\theta = \frac{TL}{KG}$$

En donde L es la longitud del eje y G el módulo de elasticidad al corte o rigidez. Las expresiones aproximadas para K están enlistadas en la tabla 5.4. de momentos de secciones.

Tabla 5.4.-Propiedades geometricas de las secciones mas comunes.

MOMENTOS DE SECCIONES

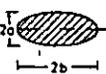
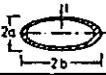
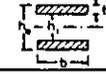
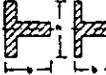
TIPO DE SECCION	A(m ²)	I _{xx} (m ⁴)	K _x (m ⁴)	I _{xx} /y _m (m ³)	Q(m ³)
	πr^2	$\frac{\pi}{4} r^4$	$\frac{\pi}{2} r^4$	$\frac{\pi}{4} r^3$	$\frac{\pi}{2} r^3$
	b^2	$\frac{b^4}{12}$	$0.14b^4$	$\frac{b^3}{6}$	$0.21b^3$
	πab	$\frac{\pi}{4} a^3 b$	$\frac{\pi a^3 b^3}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{\pi}{4} a^2 b$	$\frac{\pi a^2 b}{2}$ (a < b)
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{b^3 h}{3} ((1 - 0.58 \frac{b}{h}))$ (h > b)	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{b^2 h^2}{3h - 1.8b}$ (h > b)
	$\frac{\sqrt{3}}{4} a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{a^4 \sqrt{3}}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	$\frac{a^3}{20}$
	$\pi(r_o^2 - r_i^2)$ $= 2\pi r t$	$\frac{\pi}{4}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^3 t$	$\frac{\pi}{2}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^3 t$	$\frac{\pi}{4r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^2 t$	$\frac{\pi}{2r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^2 t$
	$4bt$	$\frac{2}{3} b^3 t$	$b^3 t ((1 - \frac{t}{b})^4)$	$\frac{4}{3} b^2 t$	$2b^2 t (1 - \frac{t}{b})^2$
	$\pi(a+b)t$	$\frac{\pi}{4} a^3 t ((1 + \frac{3b}{a}))$	$\frac{4\pi(ab)^{3/2} t}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{\pi a^2 t}{4} (1 + \frac{3b}{a})$	$2\pi t (a^3 b)^{1/2}$ (b > a)
	$b(h_o - h_i)$ $\approx 2bt$	$\frac{b}{12}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx \frac{1}{2} bth_o^2$	—	$\frac{b}{6h_o}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx bth_o$	—
	$2t(h \cdot b)$	$\frac{1}{6} h^3 t (1 + \frac{3b}{h})$	$\frac{2t b^2 h^2}{h \cdot b}$ $\frac{2}{3} b t^3 (1 + \frac{4h}{b})$	$\frac{h^2 t}{3} (1 + \frac{3b}{h})$	$\frac{2t b h}{3}$ $\frac{2}{3} b t^2 (1 + \frac{4h}{b})$
	$2t(h \cdot b)$	$\frac{1}{6} (h^3 + 4bt^2)$	$\frac{1}{3} (8tb \cdot h)$ $\frac{1}{3} h t^3 (1 + \frac{4b}{h})$	$\frac{1}{3h} (h^3 + 4bt^2)$	$\frac{t^2}{3} (8b \cdot h)$ $\frac{1}{3} h t^2 (1 + \frac{4b}{h})$
	$\lambda (1 - \frac{\pi^2 d^2}{4\lambda^2})$	$\frac{1}{8} \lambda d^2$	—	$\frac{1}{4} \lambda d$	—

Tabla 5.5.-Factores de sección para las formas geométricas más comunes

TIPO DE SECCION	RIGIDEZ		RESISTENCIA	
	ϕ_B^e	ϕ_T^e	ϕ_B^f	ϕ_T^f
	1	1	1	1
	$\frac{\pi}{3} = 1.05$	0.88	$\frac{4\pi}{9} = 1.40$	0.55
	$\frac{a}{b}$	$\frac{2ab}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{a}{b}$	$\frac{a}{b}$ (a < b)
	$\frac{\pi}{3} \frac{h}{b}$	$\frac{2\pi}{3} \frac{b}{h} (1 - 0.58 \frac{h}{b})$ (h > b)	$\frac{4\pi}{9} \frac{h}{b}$	$\frac{4\pi}{9} \frac{(b/h)}{(1 - 0.6b/h)}$ (h > b)
	$\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} = 1.21$	$\frac{2\pi}{5\sqrt{3}} = 0.73$	$\frac{\pi}{3\sqrt{3}} = 0.60$	0.39
	$\frac{r}{t}$	$\frac{r}{t}$	$\frac{2r}{t}$	$\frac{2r}{t}$
	$\frac{\pi}{6} \frac{b}{t}$	$\frac{\pi}{8} \frac{b}{t} (1 - \frac{t}{b})^4$	$\frac{4\pi}{9} \frac{b}{t}$	$\frac{\pi}{4} \frac{b}{t} (1 - \frac{t}{b})^4$
	$\frac{a}{t} \frac{(1 - 3b/a)^4}{(1 - b/a)^2}$	$\frac{8(ab)^{5/2}}{t(a^2 + b^2)(a+b)^2}$	$\frac{a}{t} \frac{(1 - 3b/a)^2}{(1 - b/a)^3}$	$\frac{16a}{t(1 + a/b)^3}$
	$\frac{\pi}{2} \frac{h^2}{bt}$	—	$2\pi \frac{h^2}{bt}$	—
	$\frac{\pi h}{6 t} \frac{(1 - 3b/h)}{(1 - b/h)^2}$	$\frac{\pi b^2 h^2}{t(h-b)^3}$ I $\frac{\pi t (1 - 4b/h)}{3 b (1 - b/h)^2}$ □	$\frac{2\pi h}{9 t} \frac{(1 - 3b/h)^2}{(1 - b/h)^3}$	$\frac{2\pi h^2}{9 t (1 - b/h)^2}$ I $\frac{2\pi t (1 - 4b/h)^2}{9 b (1 - b/h)^2}$ □
	$\frac{\pi h}{6 t} \frac{(1 - 4bt/h^2)}{(1 - b/h)^2}$	$\frac{\pi t (1 - 8bt/h)}{6 h (1 - b/h)^2}$ H $\frac{\pi t (1 - 4bt/h)}{3 h (1 - b/h)}$	$\frac{\pi h}{4 t} \frac{(1 - 4bt/h^2)^2}{(1 - b/h)^3}$	$\frac{\pi t (1 - 8bt/h)^2}{18 h (1 - b/h)^2}$ H $\frac{2\pi t (1 - 4bt/h)^2}{9 h (1 - b/h)}$
	$\frac{\pi}{2} \frac{d^2}{t\lambda}$	—	$\pi \frac{d^2}{t\lambda}$	—

El factor de forma para la torsión elástica esta definido por:

$$\phi_T^e = \frac{2\pi K}{A^2} \dots\dots\dots(4)$$

- Falla en flexión y torsión. Se comienza la zona plástica cuando el esfuerzo alcanza, en alguna parte del material, al esfuerzo de cedencia, σ_y ; el cual ocurre la fractura cuando los esfuerzos exceden la resistencia a la fractura, σ_f . En flexión, el esfuerzo es más grande en el punto y_m en la superficie de la viga el cual se apoya más lejos del eje neutral, esto es:

$$\sigma = \frac{M I}{y_m} \dots\dots\dots(5)$$

En donde M es el momento flexionante. Así, en problemas de falla en vigas, la forma entra a través del módulo de la sección, I / y_m . El factor de forma para falla en flexión se define como:

$$\phi_B^f = \frac{16\pi I^2}{y_m^2 A^3} \dots\dots\dots(6)$$

En torsión, el problema es más complicado. Para secciones circulares (tubos y cilindros), el esfuerzo cortante τ es máximo en la superficie exterior, desde la distancia radial r_m del eje de flexión:

$$\tau = \frac{T r_m}{J} \dots\dots\dots(7)$$

En donde r_m es el radio exterior del tubo y T es el par; la cantidad J/r_m en torsión es igual a I/y_m en flexión. Para una sección no circular, el esfuerzo máximo de superficie esta dado por:

$$\tau = \frac{T}{Q} \dots\dots\dots(8)$$

En donde Q , con unidades de m^3 , ahora juega el papel de I/y_m en flexión. Esto permite definir un factor de forma para falla en torsión:

$$\phi_T^f = \frac{4\pi Q^2}{A^3} \dots\dots\dots(9)$$

- Carga axial y columna flexionada. Una columna, con carga en compresión, se flexiona cuando las cargas exceden la carga de Euler

$$F_c = \frac{n^2 \pi^2 E I}{L^2} \dots\dots\dots(10)$$

En donde n es una constante que depende de las restricciones. La resistencia para flexionarse depende de I ; y los factores de forma apropiados son los mismos que se usan para la flexión elástica.

- Límites para factores de forma. El rango del factor de forma para un material dado se limita por las restricciones de fabricación o por flexión local. Por ejemplo, en el acero para tubería de pared delgada (por rolado, laminado, o por soldadura) los factores de forma tienen valores tan altos como 30.

Por lo tanto, cuando una geometría eficiente se puede fabricar, su pandeo local o falla plástica se coloca en un límite superior al factor de forma. Por ejemplo, el máximo valor útil de ϕ_B^e para aleaciones de aluminio es de alrededor de 25. El máximo valor útil para formas simples se relaciona con el módulo E y la resistencia a la falla σ_f del material.

- Geometría, rigidez y resistencia. Los factores de forma son relacionados para la eficiencia de la forma de sección transversal con respecto a la resistencia y la falla. Si, en una viga de longitud l y factor de forma ϕ_B^e , siendo el desplazamiento despreciable, entonces la flexión rígida de la viga es: (una fuerza por unidad de desplazamiento)

$$S_B = \frac{C_1 E I}{L^3} \dots\dots\dots(11)$$

En donde C_1 es una constante que depende de la carga. La viga de sección circular con la misma longitud L y sección de área A (y de este modo es peso por unidad de longitud) tiene flexión rígida

$$S_0 = \frac{C_1 E I_0}{L^3}$$

La relación de las dos flexiones rígidas (usando $I_0 = \pi r^2/4 = A^2/4\pi$) es

$$\frac{S}{S_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{4\pi I}{A^2} = \phi_B^e \dots\dots\dots(12)$$

De este modo ϕ_B^e estima las ganancias de rigidez por la forma de sección transversal: si una viga con $\phi_B^e = 9$ indica que es nueve veces más rígida para el mismo peso que una viga de sección circular sólida.

Los factores de forma para fallas estima la ganancia en carga de falla obtenida por la forma de sección transversal. La carga de falla de una viga con longitud l y factor de forma ϕ_B^f es

$$F_f = C_2 \frac{I \sigma_f}{y_m L} \dots\dots\dots(13)$$

en donde C_2 es otra constante que depende de la carga. Para una viga de sección circular con la misma longitud L y área de sección A es

$$(F_f)_0 = C_2 \frac{I_0 \sigma_f}{y_{m0} L}$$

La relación de las dos resistencias (usando $\frac{I_0}{y_{m0}} = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{A^{3/2}_0}{4\pi^{1/2}}$) es

$$\frac{F_f}{F_{f_0}} = \frac{4\pi^{1/2} I}{A^{3/2} y_m} = (\phi_B^f)^{1/2} \dots\dots\dots(14)$$

Entonces una viga con $\phi_B^f = 9$ es tres veces más fuerte que una con sección circular sólida.

Pero el propósito de este tema no es el objetivo justamente de comparar las geometrías, sino el de seleccionar la mejor combinación de material y la geometría.

5.4.2.-Índices de función en el cual se incluye la geometría.

La combinación de función-maximización del material y forma de sección transversal, por un modelo de carga dado, se muestra en la tabla 5.6 y esta relación se establece de la siguiente manera:

- Tensión axial de uniones. La habilidad de una unión para cargar una carga F sin tener deflexiones, o sin desviarse demasiado, depende sólo del área de su sección transversal, pero no de su forma. Los índices de función por rigidez ponen un peso mínimo, E/ρ , que mantiene por toda la forma de su sección transversal.

- Flexión elástica de vigas y torsión de ejes. Considerando la selección de un material para una viga de rigidez S_B , longitud L , y de masa mínima, m , teniendo en cuenta que los materiales disponibles tienen diferentes formas de sección transversal. La masa m de una viga de longitud L , y sección de área A es

$$m = A L \rho \dots\dots\dots(15)$$

Sus flexiones rígidas están dadas por la ecuación (11). Reemplazando I por ϕ_B^e y usando la ecuación (2) dada

$$S_B = \frac{C_1}{4\pi} E \phi_B^e \frac{A^2}{L^3} \dots\dots\dots(16)$$

Tabla 5.6.-INDICES DE DESEMPEÑO CON FORMA , DISEÑO DE PESO MINIMO (COSTO Y ENERGIA)

FORMA DEL COMPONENTE Y CARGA	RIGIDEZ EN EL DISEÑO MAXIMIZADO	RESISTENCIA EN EL DISEÑO MAXIMIZADO
TIRANTE (PUNTAL DE TENSION) CARGA, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	E / ρ	$\sigma f / \rho$
TORSION BARRA O TUBO TORQUE, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	$(\phi \cdot G)^{1/2} / \rho$	$(\phi \cdot \sigma_T^2)^{1/3} / \rho$
VIGA CARGADA EXTERNAMENTE O DOBLADO POR SU PROPIO PESO, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	$(\phi \cdot E)^{1/2} / \rho$	$(\phi \cdot \sigma_T^2)^{1/3} / \rho$
COLUMNA (PUNTAL DE COMPRESION) FALLA POR PANDEO ELASTICO O COMPRESION PLASTICA; CARGA APLASTANTE Y LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	$(\phi \cdot E)^{1/2} / \rho$	σ_C / ρ

FORMA DEL COMPONENTE Y CARGA	LONGITUD DE DETERMINADA FISURA MAXIMIZADA	LONGITUD DE FISURA (MIN.) MAXIMIZADA
TIRANTE (PUNTAL DE TENSION) CARGA, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	K_{IC} / ρ	$K_{IC}^{2/3} / \rho$
TORSION BARRA O TUBO TORQUE, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA Y AREA DE LA SECCION LIBRE	$(\phi \cdot K_{IC}^2)^{1/2} / \rho$	$(\phi \cdot K_{IC}^2)^{2/3} / \rho$
VIGA CARGADA EXTERNAMENTE O DOBLADO POR SU PROPIO PESO, RIGIDEZ, LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	$(\phi \cdot K_{IC}^2)^{1/3} / \rho$	$(\phi \cdot K_{IC}^2)^{2/3} / \rho$
COLUMNA (PUNTAL DE COMPRESION) FALLA POR PANDEO ELASTICO O COMPRESION PLASTICA; CARGA APLASTANTE Y LONGITUD ESPECIFICA, AREA DE LA SECCION LIBRE	$(\phi \cdot K_{IC}^2)^{1/3} / \rho$	$(\phi \cdot K_{IC}^2)^{2/3} / \rho$

COMPONENTE Y META DEL DISEÑO	PANDEO MAXIMIZADO	TORSION MAXIMIZADO
------------------------------	-------------------	--------------------

RESORTES ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ESPECIFICA VOLUMEN A SER MINIMIZADO	$(\phi \cdot \sigma)^2 / (\phi \cdot \sigma)$	$(\sigma_T^2) / E$	$(\phi \cdot \sigma)^2 / (\phi \cdot \sigma)$	$(\sigma_T^2) / G$
RESORTES ALMACENAMIENTO DE ENERGIA ESPECIFICA MASA A SER MINIMIZADO	$(\phi \cdot \sigma)^2 / (\phi \cdot \sigma)$	$(\sigma_T^2) / E\rho$	$(\phi \cdot \sigma)^2 / (\phi \cdot \sigma)$	$(\sigma_T^2) / G\rho$

Notas:

- 1).-Para minimizar el costo, use el siguiente criterio para el peso mínimo, reemplazando la densidad "ρ" por "Cρ", donde "C" es el costo por kilogramo. Para minimizar la energía contenida, use el siguiente criterio para peso mínimo reemplazando la densidad "ρ" por "qρ" donde "q" es la energía contenida por kilogramo.
- 2).- "E" = modulo de Young; "G" = modulo de esfuerzo; "ρ" = densidad; "σ f" = resistencia a la falla. "K_{IC}" = tenacidad a la fractura, los factores de forma (φ_h) (φ_v) (φ_h) (φ_v) se explican en la tabla.

Usando ésta para eliminar A en la ecuación (15) da la masa de la viga.

$$m = \left(\frac{4\pi L^3 S_B}{C_1} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho^2}{\phi_B^e E} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(17)$$

Para vigas con la misma forma, para el cual ϕ_B^e es constante, la mejor elección para la viga más ligera es el valor más alto de $E^{1/2}/\rho$. Pero si deseamos comparar dos vigas de diferente forma y fabricadas de diferentes materiales, la mejor elección es el que tiene el valor más alto del índice.

$$M_1 = \frac{(E \phi_B^e)^{1/2}}{\rho} \dots\dots\dots(18)$$

El mismo resultado se mantiene en la flexión elástica de una columna cargada axialmente. La torsión elástica de ejes es similar. Un eje de sección A y longitud L esta sujeto a un par T. Torsionandose a través de un ángulo θ . Requiriendo que la rigidez torsional T/θ , se encuentre un punto específico S_T , con una masa mínima. La masa del eje esta dada por la ecuación (15). Su rigidez torsional es

$$S_T = \frac{K G}{L}$$

En donde G es el modulo de esfuerzo cortante o rigidez, y K el momento torsional de área. Reemplazando K por ϕ_T^e y usando la ecuación (4)

$$S_T = \frac{G}{2\pi} \phi_T^e \frac{A^2}{L} \dots\dots\dots(19)$$

Usando esta para eliminar A en la ecuación (15) tenemos que:

$$m = (2 \pi L^3 S_T)^{1/2} \left(\frac{\rho^2}{\phi_T^e G} \right)^{1/2}$$

La mejor combinación de material y geometría es aquella con el valor más alto de $(\phi_T^e G)^{1/2}/\rho$. El módulo de esfuerzo cortante o rigidez G, esta relacionado con el módulo de Young E. Para propósitos prácticos aproximamos a G por 3/8E; entonces el índice de función se convierte en

$$M_2 = \frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho} \dots\dots\dots(20)$$

Para ejes de la misma geometría, esto se reduce a $E^{1/2}/\rho$. Cuando los ejes difieren en material y geometría, el índice de función (20) es el único que se usa.

- Falla de vigas y ejes. Una viga, cargada en flexión, soporta una carga específica F sin fallar. Cuando la forma no es una variable, la mejor elección es la del material con el valor máximo de $\sigma_f^{2/3} / \rho$, en donde σ_f es la resistencia a la falla del material. Si la forma es una variable, la mejor elección se establece como sigue. Las fallas ocurren si las cargas exceden la carga de falla

$$F_f = C_2 \frac{I}{y_m} \frac{\sigma_f}{L}$$

en donde C_2 es una constante que depende de la carga. Reemplazando I / y_m por el factor de forma ϕ_B^f en la ecuación (6) tenemos:

$$F_f = \frac{C_2}{4 \pi^{1/2} L} (\phi_B^f A^3)^{1/2} \sigma_f \dots\dots\dots(21)$$

Sustituyendo ésta dentro de la ecuación (15) tenemos que para la masa de la viga

$$m = \left[\frac{(4 \pi^{1/2} F_f L)}{C_2} \right]^{2/3} L \left[\frac{\rho^{3/2}}{(\phi_B^f)^{1/2} \sigma_f} \right]^{2/3} \dots\dots\dots(22)$$

La mejor combinación de material y geometría es la del valor máximo del índice

$$M_3 = \frac{(\phi_B^f)^{1/3} \sigma_f^{2/3}}{\rho} \dots\dots\dots(23)$$

Si el factor de forma es constante, se reduce a $\sigma_f^{2/3}/\rho$, pero cuando la geometría así como el material se pueden escoger, el índice M_3 debe ser usado.

La torsión de ejes se trata del mismo modo. Un eje transporta un par T sin fallar. Esto significa que T no exceda el par de falla Tf, en donde, de la ecuación (8),

$$T_f = Q \tau_f$$

Reemplazando Q por ϕ_T^f y con la ecuación (9) tenemos que:

$$T_f = \frac{(\phi_T^f)^{1/2} A^{3/2}}{4 \pi^{1/2}} \sigma_f \dots\dots\dots(24)$$

En donde τ_f es la resistencia a la falla al corte, y se ha reemplazado por $\sigma_f/2$, que es la resistencia de tracción a la falla. Usando esto para eliminar el área A y la ecuación (5) tenemos que para la masa del eje se obtiene:

$$m = (4 \pi^{1/2} T_f)^{2/3} L \left[\frac{\rho^{3/2}}{(\phi_T^f)^{1/2} \sigma_f} \right]^{2/3} \dots\dots\dots(25)$$

La función se maximiza para el valor más alto de

$$M_4 = \frac{(\phi_T)^{1/3}}{\rho} \sigma_f^{2/3} \dots\dots\dots(26)$$

5.5 Selección de materiales contra la falla.

Después de conocer los criterios de selección de materiales con y sin tomar en cuenta la geometría y teniendo los conocimientos del análisis de mecánica de fracturas, se pueden tener las bases para poder seleccionar un material adecuado.

Primeramente se verán los ensayos no destructivos que es un método del análisis de ingeniería en el cual se detectan las fallas y defectos en materiales combinado con la vida remanente del componente. La detección de grietas se descubre mediante una variedad de técnicas físicas conocidas como pruebas no destructivas. Los seis principales métodos utilizados en las pruebas no destructivas se mencionan en la siguiente tabla (5.7)

TABLA 5.7.- PRINCIPALES MÉTODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

MÉTODO DE INSPECCIÓN	CUÁNDO USARLO	DONDE USARLO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Corrientes parásitas	Para medir variaciones en espesores de paredes de metales o capas delgadas; para detectar costuras o vetas longitudinales o fisuras en tubos; para determinar tratamientos térmicos y composiciones metálicas para su clasificación.	Tubería y barras, partes de geometría uniforme, placas o materiales planos, o laminas y alambre.	Alta velocidad, ningún contacto, automático.	Falsas indicaciones como resultado de las muchas variables; sólo es útil para materiales conductores; profundidad de penetración limitada.
Radiografía:	Para detectar imperfecciones y defectos internos; para encontrar fallas en soldadura, fisuras,	Ensamblajes de partes Electrónicas, piezas coladas, recipientes soldados; Prueba de campo de	Proporciona un registro permanente en la película; funciona bien en secciones delgadas; alta	Alto costo inicial es necesaria una fuente de poder; riesgo por radiación; se necesitan técnicos

Rayos X	vetas o costuras, porosidad, hoyos, inclusiones, falta de fusión; para medir variaciones en espesor	soldaduras; imperfecciones de corrosión; componentes de materiales no metálicos	sensibilidad; técnicas de flujo roscopia disponibles; nivel de energía ajustable.	entrenados
Rayos Gamma	Para detectar imperfecciones internas, fisuras, vetas o costuras hoyos, inclusiones, defectos de soldadura; para medir variaciones de espesor.	Forja, fundiciones, tubería, recipientes soldados; prueba de campo de tuberías soldadas; inspecciones de corrosión	Detecta gran variedad de imperfecciones; da un registro permanente; portátil; bajo costo inicial la fuente de suministro es pequeña (útil para tomas internas); hace exposiciones panorámicas.	Un nivel de energía por fuente; riesgo por radiación; se necesitan técnicos entrenados; la fuente pierde potencia continuamente.
Partículas magnéticas	Para detectar imperfecciones superficiales o subsuperficiales no profundas, fisuras, porosidad, inclusiones no metálicas y defectos de soldadura.	Sólo para materiales ferromagnéticos; partes de cualquier tamaño, forma, composición o tratamiento térmico.	Económico, de principio sencillo, fácil de efectuar; portátil (para prueba de campo); rápido para prueba durante la producción industrial.	El material debe ser magnético; se requiere desmagnetización después de la prueba; fuente de potencia necesaria.
Líquidos Penetrantes	Para localizar fisuras superficiales, porosidad, traslapes, defectos por falta de calor, falsas uniones, fatiga y fisuras por esmerilado	Todos los metales, vidrio y cerámicas, piezas coladas, forjas, partes maquinadas y herramientas de corte; inspecciones de campo.	Sencillo de aplicar, portátil, rápido, bajo costo; resultados fáciles de interpretar, no necesita preparativos complicados.	Limitado a defectos superficiales; las superficies deben estar limpias.
Eco-pulso ultrasónico	Para encontrar defectos internos, fisuras, falsas uniones, laminaciones, inclusiones, porosidad; para determinar la estructura de grano y espesores.	Todos los metales y materiales no metálicos duros; láminas, tubos, varillas, forjas, piezas coladas; prueba de campo y producción; prueba de partes en servicio; uniones de enlace adhesivas y soldadas.	Rápido, confiable, fácil de operar; facilita la automatización; los resultados de la prueba se conocen de inmediato; relativamente portátil, muy exacto, sensible.	Requiere contacto o inmersión de la parte, y la interpretación de lecturas; necesita entrenamiento.

Una vez identificadas las fallas por ensayos no destructivos y recordando lo que se vió en el capítulo anterior en el cual se hacia una clasificación por examinación macroscopica de las fallas, donde la apariencia de la superficie se describe en función de la reflexión de la luz (brillosa u opaca) y la textura (suave o aspera), cristalina o sedosa, granular o fibrosa todo esto nos indica el modo de falla, las características macrofractográficas se vieron a detalle en el capítulo anterior. A continuación se mostraran unas cartas de identificación de los modos de fractura que son de gran ayuda, ya que, se presenta en forma resumida para una fácil identificación del tipo de fallas.

Tabla 5.8.a.-Carta de identificación de los modos de fractura (Modo de falla instantánea)

MÉTODO	MODO DE FALLA INSTANTÁNEA	
	SOBRECARGA DÚCTIL	SOBRECARGA FRÁGIL
Visual 1 a 50 (x) (superficie de fractura)	<ul style="list-style-type: none"> • Adelgazamiento o distorsión en la dirección con cargas aplicadas. • Fractura fibrosa. • Orillas o bordes con esfuerzo cortante. 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay distorsión o muy poca. • Fractura lisa. • Textura burda o textura con brillo. • Granos cristalinos. • Rayos en el punto de origen.
Microscopio Electrónico De Barrido 20 a 10000 (x) (superficie de fractura)	<ul style="list-style-type: none"> • Microhuecos u Hoyuelos elongados en la dirección de la carga. • Grietas o Grietas sin ramificaciones. • Deslizamiento de Superficies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hendiduras, resquebraduras, fracturas intergranulares. • El área original puede contener una imperfección o un concentrador de esfuerzos.
Inspección Metalografica 50 a 1000 (x) (sección transversal)	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión de granos (Granular) y fluida cerca de la fractura. • Fractura transgranular irregular. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión pequeña intergranular o transgranular. • Muecas en la superficie o fases de fragilidad interna.

MÉTODO	MODO DE FALLA INSTANTÁNEA	
	SOBRECARGA DÚCTIL	SOBRECARGA FRÁGIL
Factores que contribuyen	<ul style="list-style-type: none"> • Carga excedida con respecto a la resistencia de la parte. • Verificar si la aleación es apropiada y el procesamiento mediante una prueba de dureza o un examen destructivo o no destructivo. • Temperaturas Altas. • Un alto esfuerzo de ruptura tiene una apariencia dúctil. • La dirección de la carga puede mostrarnos que la falla fue secundaria. 	<ul style="list-style-type: none"> • La carga excedió la resistencia dinámica de la parte. • Verificar si la aleación es apropiada y el procesamiento así como el tamaño de grano. • La dirección de la carga puede mostrarnos que la falla fue secundaria o por impacto. • Temperaturas Bajas.

Tabla 5.8.b.-Carta de identificación de los modos de fractura (Modo de falla progresiva)

Método	Modo de Falla Progresiva			
	Fatiga	Corrosión	Desgaste	Fluencia o Termofluencia
Visual 1 a 50 (x) (superficie de fractura)	<ul style="list-style-type: none"> • Zona progresiva plana o lisa con bordes en las orillas de la zona afectada. • Zona de sobrecarga consistente con una dirección de carga aplicada. • Marcas de trinquete donde hay junta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Merma general. • Picaduras o zanjas. • Corrosión y daño por hidrogeno puede crear múltiples grietas que provocan fragilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión, rozaduras, raspaduras, ranuras, pulido. • Faldón en la dirección del movimiento. • Gastado o desgaste. • Desgaste gradual con una transición en la merma del propio desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparición de fisuras. • En la superficie externa se aprecia un cambio en los revestimientos

Método	Modo de Falla Progresiva			
	Fatiga	Corrosión	Desgaste	Fluencia o Termofluencia
Microscopio Electrónico de Barrido 20 a 10000 (x) (superficie de fractura)	<ul style="list-style-type: none"> • Zona Progresiva: Apariencia desgastada, plana, puede presentar estrías o estriaduras con una ampliación arriba de 500 (x). • Zona de Sobrecarga: Puede estar dúctil o frágil. 	<ul style="list-style-type: none"> • La penetración de la trayectoria puede ser irregular, intergranular o una fase de ataque selectiva. • Una espectroscopia dispersiva de energía nos puede ayudar a identificar la corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desechos de desgaste y/o raspaduras o rozaduras pueden ser caracterizadoras. • Aparece fatiga por contacto rodante como un desgaste reciente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las caras de los granos pueden presentar porosidades. • Fisuras intergranulares múltiples con diferente escala.
Inspección Metalografica Inspección Metalografica 50 a 1000 (x) (sección transversal)	<ul style="list-style-type: none"> • Zona Progresiva: Usualmente transgranular con una distorsión aparente pequeña. • Zona de Sobrecarga: Puede estar dúctil o frágil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ataque de la superficie localizado o general (picaduras, agrietamientos). • Fases de ataque selectiva. • Escalas de corrosión en cuanto a morfología y espesor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede localizar la distorsión en la superficie; y observar en que dirección se efectuó el movimiento. • Identificación de partículas incrustadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio en microestructura típica de un sobrecalentamiento. • Grietas intergranulares múltiples. • Huecos sobre las fronteras de los granos. • Precipitaciones internas o escalas de reacción (diferentes). • En el último estado de la falla existe como estiramiento

Método	Modo de Falla Progresiva			
	Fatiga	Corrosión	Desgaste	Fluencia o Termofluencia
Factores que contribuyen	<ul style="list-style-type: none"> • Los esfuerzos cíclicos excedieron el límite de resistencia del material. • Verificar que la resistencia sea adecuada, el terminado de la superficie, ensamblado y operación. • Un daño previo hecho por algún medio mecánico o corrosivo pudo haber iniciado una grieta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe evaluar el tipo de aleación así como la morfología del ataque. • Una severa exposición de condiciones; verificar: PH, Temperaturas, Rangos de flujo Oxidantes disueltos, Corrientes eléctricas, Unión o acoplamiento o de metales, Agentes agresivos. • Verificar la composición de masa y los contaminantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • En ranuras, raspaduras o rayaduras: verificar la fuente que las produjo. • Evaluar la efectividad de los lubricantes. • Posibles fallas en los filtros o en los sellos. • Gastaduras o rozaduras en uniones como abrazaderas son hechas por una vibración ligera. • Se puede eliminar o reducir el problema mediante el diseño de nuevos materiales o materiales antifricción. • Contaminación por agua. • Altas velocidades. • Un flujo de desigual del lubricante. • Cavitación. 	<ul style="list-style-type: none"> • En una temperatura muy elevada un sobrecalentamiento y/o un esfuerzo alto. • Una microestructura inestable y un tamaño de grano pequeño incrementa la fluencia. • Después de una exposición prolongada ocurren roturas, fracturas. • Verificar que la aleación sea la adecuada.
factores que contribuyen	<ul style="list-style-type: none"> • Alineación, vibraciones, balanceo. • Ciclos altos y bajo esfuerzo implican una zona de fatiga grande. • Ciclos bajos y esfuerzos grandes implican una zona de fatiga pequeña. 			

Una vez que se identifica el tipo de falla, con ayuda de las tablas 5.9 y 5.10 podemos corregir el tipo de propiedad del material que esta fallando o propiedades además del tipo de condiciones que la produjeron como es el tipo de carga, esfuerzos y temperatura de operación.

Suponiendo que la palanca de alguna máquina presenta una gran deformación como tipo de falla, primero se observa la tabla 5.9 y vemos que la resistencia a la cedencia y la resistencia a la cedencia al cortante tienen un valor bajo para los requerimientos de nuestro diseño, entonces hay que volver a realizar un análisis para determinar el valor óptimo y con esto cambiar el tipo de material o cambiar el diseño.

Posteriormente con la tabla 5.10 también determinamos que este tipo de falla se presentó por una carga estática y un tipo de esfuerzo de tracción, compresión o cortante y además muy probablemente la falla apareció por una diferencial de temperatura irregular, este análisis nos auxilia para reafirmar el tipo de falla.

Ya que se tiene un conocimiento y un entendimiento de la mecánica de fractura y la relación entre las propiedades mecánicas y su microestructura podemos analizar las fallas durante el servicio.

El siguiente cuestionario nos va ayudar a realizar un análisis cuantitativo de las fallas en el cual tomaremos en cuenta la geometría, el estado de esfuerzos, caracterización de la grieta, las observaciones fractográficas e información metalúrgica.

Al realizar este análisis se conocerá con certeza la causa o causas de la falla para no desviarse del objetivo principal. El objetivo del cuestionario es minimizar el trabajo de "adivinanza" es decir no adivinaremos porque falló sino el cuestionario nos dará una amplia información de la falla.

Tipo de Falla	Tipo de carga		Tipo de esfuerzos		Temperatura de operación		Criterio generalmente empleado para la selección del material
	Estatica	Repetida	Tracción	Compresión	Cortante	Baja	
Fractura frágil							Temp. de transición de muestras y Charpy; Tenacidad con medidas de tenacidad Kic
Fractura dúctil							Resistencia a la tracción, resistencia a la cedencia del corte
Fatiga alto No. de ciclos							Resistencia a la fatiga para una vida esperada con típicos concentradores de esfuerzos
Fatiga bajo No. de ciclos							Ductilidad estática disponible y el pico esperado de deformación plástica cíclica con concentradores de esfuerzo durante la vida preestablecida.
Corrosión fatiga							Resistencia a la corrosión, fatiga para el metal y contaminante para el mismo tiempo.
Pandeo							Módulo de elasticidad y resistencia a la cedencia en compresión.
Gran deformación							Resistencia a la cedencia
Termofluencia							Velocidad de termofluencia o resistencia a la ruptura a esfuerzo constante para la temperatura y vida esperada.
Agricriamiento por hidrogeno							Estabilidad bajo esfuerzo y medio ambiente rico en hidrogeno u otra sustancia
Agricriamiento por corrosión bajo tensión							Esfuerzo residual o aplicado resistencia a la corrosión al medio ambiente, mediciones K155c

TABLA 5.9.- RELACION ENTRE TIPOS COMUNES DE FALLA Y LAS CONDICIONES QUE LA PRODUCEN

Tipo de Falla	Propiedades de los Materiales															
	Resistencia a la traccion maxima	Resistencia a la cedencia	Resistencia a la compresion	Resistencia a la cedencia al cortante	Propiedades a la fatiga	Ductilidad	Energia al impacto	Temperatura de transicion	Modulo de Elasticidad	Velocidad de Termofluencia	Kic	Kisc	Potencial electroquimico	Dureza	Coefficiente de expansion	
Gran deformacion																
Pandeo																
Termofluencia																
Fractura fragil																
Fatiga bajo No. de ciclos																
Fatiga alto No. de ciclos																
Fatiga por contacto																
Erosion																
Corrosion																
Aumentando por corrosion bajo tension																
Corrosion galvanica																
Aumentando por hidrogeno																
Desgaste																
Fatiga-termica																
Fatiga-deformacion																

TABLA 5.10. - RELACION ENTRE LOS TIPOS DE FALLA Y PROPIEDADES MECANICAS

DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE UN ANÁLISIS COMPLETO DE FALLA.

I. Descripción de los componentes forma, tamaño y uso. _____

A. Areas especificas de concentración de esfuerzos . _____

1. Magnitud de la concentración de esfuerzos en el lugar de la falla. _____

II. Estado de esfuerzo de los componentes.

A. Tipo de esfuerzos.

1. Magnitudes de los niveles de los esfuerzos del diseño.

a. Esfuerzo medio. _____

b. Rango de esfuerzos. _____

2. Tipo de esfuerzo. _____

3. Presencia de gradiente de esfuerzos. _____

B. Estado de esfuerzos: Condición de deformación plana vs. Condición de esfuerzos planos.

1. Apariencia de la superficie de fractura: porcentaje de labios de deformación.

2. Estimación del tamaño de la zona plástica calculada por el radio del espesor.

C. Naturaleza de la variación de las cargas.

1. Horas de operación del componente. _____
2. Frecuencia de los ciclos de carga. _____
3. Comportamiento de la carga. _____
 - a. Cargas aleatorias. _____
 - b. Existencia de sobrecargas debidas a eventos anormales en la vida de servicio. _____

III. Detalles de grietas críticas.

A. Datos de la inspección previa. _____

1. Hallazgos de la inspección previa. _____

B. Indicios de que la grieta crítica permitió la fractura.

1. Localización de la grieta crítica por inspección macroscópica. _____
2. Tamaño, forma y orientación de la grieta crítica. _____
3. Superficial o empotramiento de la grieta. _____
4. Dirección de la propagación de la grieta como resultado de:

Marcas Chevron _____ Marcas hacia adentro _____

Marcas de playa _____

Dirección _____

C. Defectos de manufactura relacionados con la iniciación de la grieta.

Rasguños. _____ Desajustes. _____

Cortes internos. _____ Otros. _____

Defectos por soldadura. _____

D. Defectos metalúrgicos relacionados con la iniciación de la grieta.

Inclusiones. _____ Vacios. _____
Partículas de segunda fase. _____ Interfaces débiles. _____
Escoria atrapada. _____ Otros. _____

E. Observaciones fractográficas.

1. Observaciones cualitativas.

Ruptura con hoyuelos _____ Fatiga por estriado _____
Clivaje. _____ Corrosión. _____
Intercristalino. _____ Desgaste. _____

2. Observaciones cuantitativas.

a. La posición de la longitud de la grieta se conoce por el espaciamiento

estriado. _____

b. El espaciamiento estriado muestra si las cargas son aleatorias o ..

uniformes. _____

C. El principio de una fractura inestable se indica por una zona ancha y

larga. _____

IV Especificaciones de los componentes del material.

A. Aleación designada. _____

B. Propiedades mecánicas.

	σ_{ys}	σ_{ts}	% elong.	% R.A.	K_{Ic}	K_{IEAC}	características de la fatiga
Especificada							
Actual							

C. Componentes químicos de la aleación.

	A	B	C	D	E	F	G
Especificada							
Actual							

D. Tipo de fundición.

Fundición por gravedad. _____

Fundición a presión. _____

Otro. _____

E. Acabado del lingote.

Laminado en frío. _____

Laminado en caliente. _____

Laminado en frío y en caliente. _____

F. Tratamiento termomecánico.

Recocido o Tratamiento en soluciones. _____

Revenido o Endurecimiento por envejecimiento. _____

Trabajo mecánico intermedio. _____

G. Manufactura de la pieza.

1. Forja _____

Embutido _____

Fundición. _____

Extruido. _____

Maquinado. _____

Otros. _____

2. Detalles de unión.

Soldadura. _____

Tornillos. _____

Adhesivos. _____

Remaches. _____

Otros. _____

H. Tratamiento superficial.

Perdigoneado _____

Niquelado _____

Laminado en frío. _____

Plateado _____

Carburizado. _____

Desoxidación por baño ácido. _____

Nitrurizado. _____

Otro. _____

I. Microestructura del componente.

1. Presencia de fibras mecánicas y/o bandas a partir de una segregación química. _____

2. Tamaño y forma del grano. _____
- a. Elongado con respecto al esfuerzo axial. _____
 - b. El tamaño de grano cambió en la forja. _____

3. Clasificación y conteo de inclusiones.

Una vez que se contestó el cuestionario se tienen los factores que mencionaremos a continuación los cuales nos van a ayudar a determinar en donde ocurrió el error.

Entre los **errores de diseño** se tienen algunos como los de forma geométrica el efecto que tienen los concentradores de esfuerzos sobre la resistencia a la fatiga etc.

Las grietas por fatiga usualmente se inician en alguna región donde hay concentradores de esfuerzos resultantes de la presencia de discontinuidades en la superficie, tales como un borde, una ranura u otras.

Bajo una carga estática en un material dúctil si el esfuerzo excede la resistencia de cedencia del material, una deformación plástica ocurre y el esfuerzo se redistribuye. Pero si la pieza esta sometida a una carga fluctuante o alterna y existe una grieta por fatiga y este esfuerzo que se aplicó esta por debajo de la resistencia a la cedencia del material; la redistribución del esfuerzo por una deformación plástica no ocurrirá y el material quedará sometido a todo el efecto del concentrador de esfuerzo.

Los concentradores de esfuerzos afectan a la fatiga de diferente manera en diferentes materiales. Por ejemplo en un material frágil es más susceptible que un material dúctil.

A continuación tenemos una ilustración donde podemos observar de que manera se distribuyen los esfuerzos.

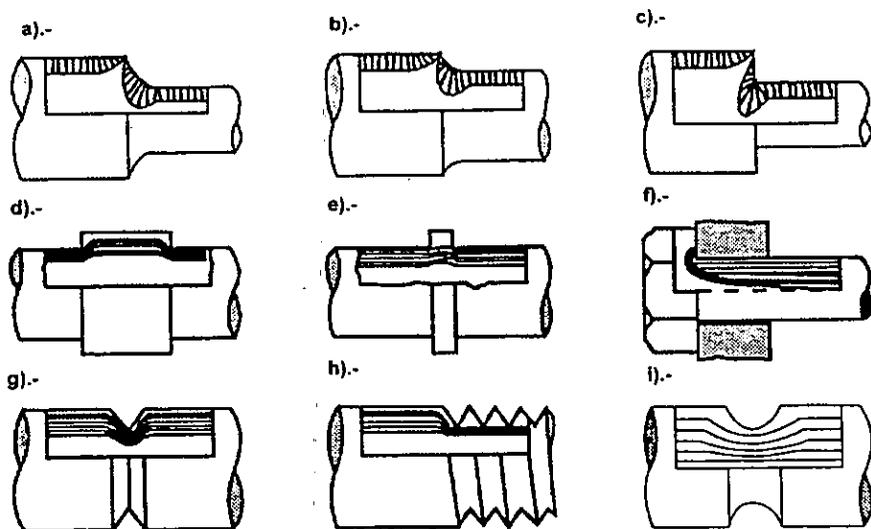


Figura 5.7.- Efecto del aumento en los esfuerzos debido a la concentración y distribución de los mismos por algunos cambios de forma en los componentes.

Por ejemplo de la figura (a) a la figura (c) al incrementar el radio del filete se consigue una mejor distribución de los esfuerzos. En la figura (d) vemos el esfuerzo causado por la presencia de un collar muy ancho, en cambio en la figura (e) se observa el descenso en la distribución de esfuerzos. En la figura (f) se observa la distribución de esfuerzo en una unión. En la figura (g) observamos una distribución de esfuerzo más cargada que en la figura (i) pero si tenemos una geometría como la figura (h) se distribuye mucho mejor el esfuerzo de igual manera que si fuera un arreglo con la geometría del tipo de la figura (i).

Entre los defectos de manufactura se tienen:

Imperfecciones producidas durante el formado, uniones, maquinados y otros procesos de fabricación los cuales pueden producir una fractura frágil o dúctil.

Por ejemplo en las operaciones de formado como extrusión, estampado, doblado y otras pueden producir muchas imperfecciones si el procesamiento y el material no son adecuados. Existen otros factores donde depende el tipo de aleación, la velocidad de extrusión, si esta velocidad es muy alta se pueden formar fisuras en las orillas de la pieza estas pueden ser grietas intergranulares.

Una extrusión en frío puede producir imperfecciones internas como marcas Chevron, grietas o estalladuras en el centro. Algunos de los factores que se pueden contribuir a las marcas Chevron son ángulos incorrectos muy grandes o muy chicos, una reducción brusca del área, una costura excesiva en el lingote y una lubricación insuficiente.

En las operaciones de maquinado muchas piezas al terminarse contienen marcas las cuales dependiendo de su localización y cantidad determinan como van a influir los concentradores de esfuerzos. Las esquinas y los filetes son causas de esfuerzos concentradores más severos. Otro tipo de concentrador de esfuerzos son las inclusiones.

En la operación de rectificado o pulido las grietas pueden generarse por un calor excesivo durante la operación. Un rectificado fuerte puede alcanzar una temperatura austenítica y con el rápido enfriamiento nos puede dar una superficie frágil. Además de que puede contener muchos esfuerzos compresivos residuales, por lo que muchas veces es conveniente realizar un tratamiento térmico. Un método para observar las

quemaduras por rectificado o pulido consiste en poner a la superficie una solución del 5% al 10% de ácido nítrico la cual se pondrá gris oscura si esta quemada.

En las operaciones de soldadura algunas de las imperfecciones que podemos encontrar son porosidades, una fusión incompleta, inclusiones; otra imperfección, no muy común, es el ojo de pescado la cual es causada por la presencia de hidrógeno y este causa que se provoque una fragilización. El uso de electrodos con bajo hidrógeno puede evitar estas imperfecciones. Es importante controlar el arco de la soldadura cuando son dos metales diferentes, ya que el punto de fusión es diferente en cada uno. Para detectar imperfecciones en las soldaduras podemos hacer uso de técnicas no destructivas.

En las operaciones de tratamientos térmicos pueden producirse defectos tales como el sobrecalentamiento o quemado de la pieza lo que implica una reducción en la resistencia y ductilidad. Por ejemplo una muesca en un acero requiere buena tenacidad y no debe ser carburizado o nitrurado. Las grietas por temple pueden ocurrir durante estos tratamientos térmicos. Las grietas por temple en el acero se producen durante la transformación de austenita a martensita y las grietas martensíticas casi siempre son frágiles y no tienen ductilidad. Dichas grietas son fáciles de reconocer primero, la grieta generalmente va de la superficie hacia el centro de la masa y casi formando una línea recta, en el extremo de la superficie se observan unos labios de deformación. Segundo, las grietas no tienen nada de descarburización y por último presentan una textura cristalina fina en la superficie.

Dentro de los errores en el mantenimiento se tiene el no realizar adecuadamente la ruta del mantenimiento; el no informar de una falla futura, la cual se puede determinar haciendo uso de la mecánica de fracturas donde se puede dictaminar

el tamaño de la grieta y el crecimiento de la grieta. La resistencia de un componente disminuye con el tamaño de las grietas. Una de las ventajas que se tiene con el mantenimiento es que podemos reemplazar o reparar la pieza, evitando la falla.

Exceder límites de diseño: Aquí nos podemos referir a una carga excesiva o alta o los niveles de esfuerzo en general en operación fueron demasiado altos lo que lleva a que la pieza o el diseño falle. Si uno puede obtener información sobre los esfuerzos uno puede conocer las propiedades del material y viceversa con esto podemos determinar si los esfuerzos fueron demasiados altos o el material era inadecuado.

Factores ambientales: Muchos de los diseños se calculan correctamente en base a los esfuerzos, pero algunas veces la pieza es sometida a factores ambientales muy severos como erosión, viento, temperatura, salinidad, humedad y otros. Y es aquí donde estos factores afectan a nuestro diseño.

Tomar en cuenta la durabilidad: La dureza y las propiedades mecánicas que se requieren para una pieza para que de el mejor servicio implica determinar una microestructura específica del material.

Usar un margen de seguridad. Es un intervalo para el cual nuestro diseño tiene la confiabilidad de que no fallará y en términos ingenieriles lo podemos definir como:

$$N = \frac{\text{Resistencia significativa del material}}{\text{Esfuerzo significativo correspondiente}}$$

Esto quiere decir que si el factor de seguridad se va dar en término de resistencia a la fatiga, se pondrán los valores que correspondan a propiedades en la fatiga.- si hay fractura como si el material fuera frágil, el factor se basa en la resistencia a la tensión, y así sucesivamente.

El factor de seguridad también puede definirse en términos de cargas:

$$N = \frac{\text{Carga última o de falla del material}}{\text{Carga significativa a la que se somete el material}}$$

Teniendo cuidado nuevamente de poner la propiedad que queremos asegurar ya sea fatiga, impacto, etc. Por ejemplo, si un material tiene una resistencia significativa de 200 Mpa y el esfuerzo significativo al que se somete el material es de 100 Mpa, el factor de seguridad es 2.

Actualmente el diseño ingenieril toma en cuenta racionalmente todos los factores posible, dejando relativamente pocos puntos de incertidumbre para cubrirlos con un factor de seguridad que, por lo común, queda dentro de los límites de 2-4. Aunque todavía se encuentran en los manuales factores de seguridad con valores tan altos como 20 y 30.

Para esto nos podemos apoyar en los siguientes conceptos y considerar los siguientes factores de seguridad.

- A) Grado de incertidumbre de la carga.
 - B) Grado de incertidumbre en la resistencia del material.
 - C) Incertidumbre en relación con las cargas aplicadas con respecto a la resistencia del material.
 - D) Consecuencia de la falla, seguridad humana y economía.
 - E) Costo por proporcionar un factor elevado de seguridad.
1. $N = 1.25$ a 1.5 para materiales excepcionalmente CONFIABLES que se usan bajo condiciones controladas y sujetas a cargas y esfuerzos que puedan determinarse con certeza; usados en forma casi invariable donde el bajo peso es una consideración particularmente importante.

2. $N = 1.5$ a 2 para materiales bien conocidos, bajo condiciones razonablemente CONSTANTES DEL AMBIENTE sujetos a cargas y esfuerzos que pueden determinarse fácilmente.
3. $N = 2$ a 2.5 para materiales PROMEDIO que operan en ambientes comunes y sujetos a cargas y esfuerzos que pueden determinarse.
4. $N = 2.5$ a 3 para materiales FRAGILES o para los que no han sido examinados bajo condiciones promedio del ambiente, carga y esfuerzo.
5. $N = 3$ a 4 para materiales que NO SE HAN EXAMINADO y que se han usado bajo condiciones promedio de ambiente, carga y esfuerzo.
6. $N = 3$ a 4 debe usarse también con materiales mejor conocidos que se usaran en MEDIOS INCIERTOS o estarán sometidos a esfuerzos indeterminados.
7. Cargas Repetidas: Los factores establecidos en los puntos 1 a 6 son aceptables, pero se deben aplicar a la RESISTENCIA A LA FATIGA y no a la resistencia de cedencia del material.
8. Fuerzas de Impacto: Los factores dados en los puntos 3 a 6 son aceptables, pero se debe incluir un FACTOR POR IMPACTO.
9. Materiales FRAGILES: Si la resistencia final se usa como el máximo teórico, los factores presentados en los puntos 1 a 6 se deben casi duplicar.
10. Cuando son favorables los factores más altos, se debe realizar un análisis más cuidadoso del problema antes de decidir su uso.

Finalmente se pasará al siguiente capítulo que trata acerca de la confiabilidad total en el diseño el cual es muy importante por que aunque se hallan tomado en cuenta todos los aspectos de Ingeniería Mecánica se deben tomar en cuenta los aspectos

probabilísticos en el diseño. Ya que tanto en la Vida como en el Diseño siempre hay que tomar en cuenta el aspecto probabilístico.

CAPITULO 6 CONFIABILIDAD TOTAL

6.1. – Introducción.

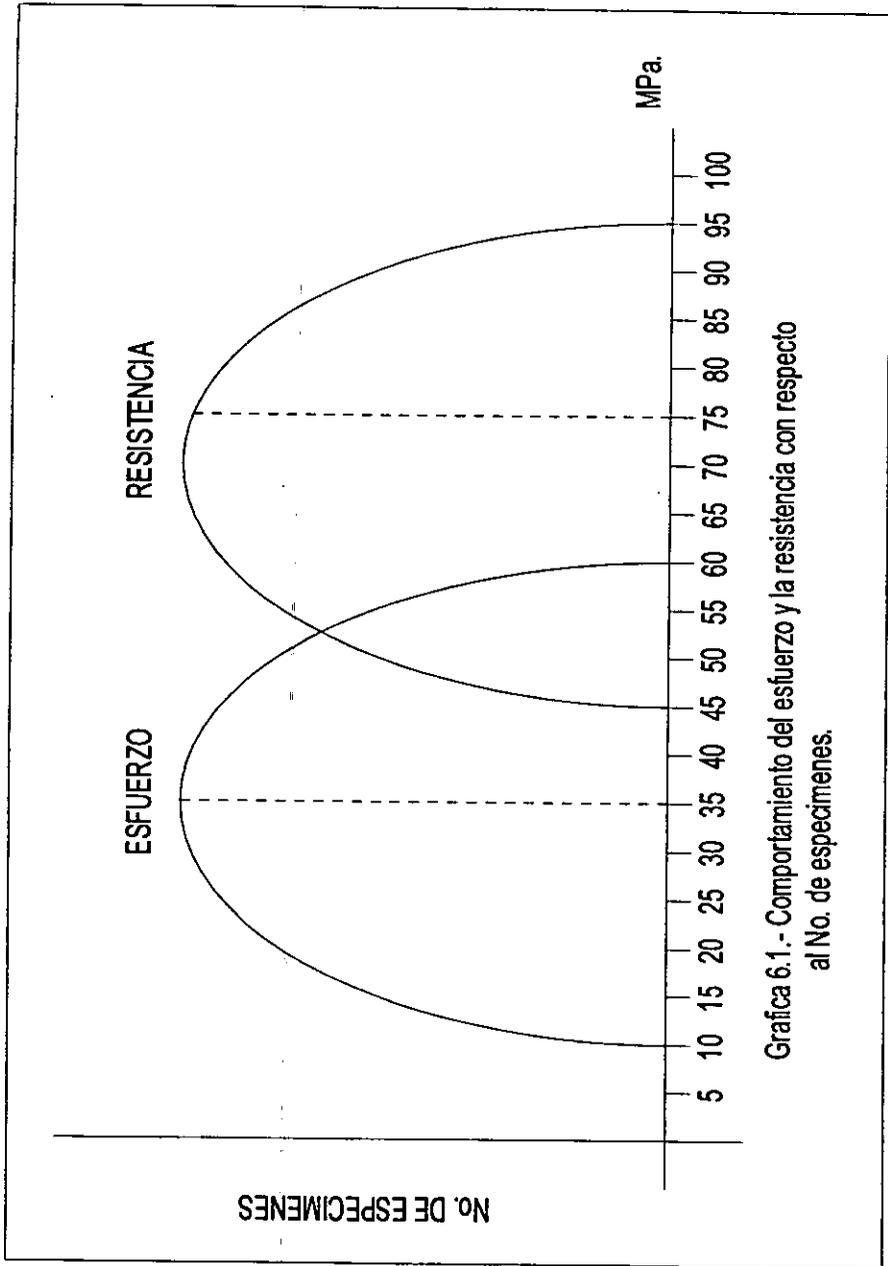
En la actualidad la ingeniería busca que su diseño tenga una probabilidad de falla nula o cercana a cero y esta lo logra a través de varias disciplinas, en la que nosotros nos apoyamos principalmente es en la ingeniería confiable la cual va de la mano del uso de la probabilidad y ¿ porque es necesario apoyarnos en la probabilidad? Porque la probabilidad tiene herramientas tan fuertes como son la media, desviación estándar, distribución normal, de Weibull y otras que nos indican el comportamiento de los elementos a utilizar en el diseño. La utilidad del enfoque de confiabilidad depende de la disponibilidad de información adecuada sobre la distribución estadística de:

- a). Carga aplicada a las partes en servicio mediante la cual se pueden calcular los esfuerzos significativos y
- b). La resistencia significativa de las partes manufacturadas en condiciones de producción.

La figura 6.1. muestra las curvas de distribución para el esfuerzo significativo y para las resistencias significativas correspondientes.

Observamos que el valor medio de la resistencia es 75 y el valor medio de los esfuerzos es 35. Esto significa que si una parte "promedio" de la producción se pone en servicio bajo condiciones de carga "promedio" tendrá un margen de seguridad de 40. Pero observemos el área donde se enciman las curvas que son de 45 a 60, ¿Qué pasaría si alguna parte se somete a condiciones de cargas severas y su esfuerzo llegara a 60 y esa pieza tuviera una resistencia de 50? Ocurriría la falla.

CONFIABILIDAD



Grafica 6.1.- Comportamiento del esfuerzo y la resistencia con respecto al No. de especimenes.

Esto es precisamente lo que estudiaremos a continuación con más detalle y profundidad para poder prevenir la falla, como medir estos índices y algunos métodos para poder evitar la falla y de esta manera aumentar la confiabilidad de nuestro diseño o sistema.

6.2.- Probabilidad en el diseño.

6.2.1.- Probabilidad.

El concepto de probabilidad es parte de nuestra base de conocimientos generales. La definición clásica de probabilidad analiza una serie de sucesos que pueden o no ocurrir.

Si tenemos que "N" es el total de posibles resultados entonces la probabilidad de que un evento "A" pueda ocurrir es igual a:

$$P(A) = \text{numero de casos en "N" que producen "A"} / "N" = n / "N"$$

y la probabilidad de que un evento pueda no ocurrir es $P(\bar{A})$ y

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) = N - n / N$$

donde el evento "A" puede ocurrir o no ocurrir

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1.0$$

la probabilidad de que un evento "A" ocurra esta dada por

$$P(A) / P(\bar{A})$$

Una suposición básica y fundamental de la teoría de la probabilidad es que trata con eventos aleatorios, las condiciones por las que se rigen estos eventos, son tales que cada miembro del universo de sucesos tienen la misma oportunidad de ser seleccionados.

6.2.2.- Notación de probabilidad.

Un especial y preciso sistema de lenguaje y notación son usados en la teoría de probabilidad. Dos eventos A y B pueden ser independiente si la ocurrencia de una no tiene efectos en la ocurrencia de la otra.

1. - La probabilidad de que ambos eventos A y B puedan ocurrir al mismo tiempo es:

$$P(A \text{ y } B) = P(AB) = P(A) P(B)$$

si A y B son eventos mutuamente exclusivos o sea que si la ocurrencia de uno imposibilita la ocurrencia de los otros entonces

$$P(AB) = 0$$

2. - La probabilidad de que A o B ocurra es:

$$P(A \text{ o } B) = P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB)$$

si A y B son mutuamente exclusivos

$$P(A + B) = P(A) + P(B)$$

3. - La probabilidad condicional es donde la probabilidad de un evento depende de que el otro evento haya ocurrido.

$P(A / B)$ = probabilidad que A pueda ocurrir dado que B ha ocurrido

$$P(A / B) = P(AB) / P(B) \quad \text{o} \quad P(B / A) = P(AB) / P(A)$$

6.2.3.- Distribución de frecuencia.

Cuando un gran número de observaciones están hechas a base de muestras aleatorias, es necesario utilizar un método que organice estos datos. Dentro de un grupo de valores clasificados por intervalos se determina la frecuencia de las observaciones que caen dentro de cada intervalo.

Un estimado de la distribución de frecuencias de las observaciones puede ser obtenidas al graficar esta frecuencia o número de veces que cae dentro de cada intervalo de valores, este tipo de gráficas es conocido como histograma, si el número de observaciones se incrementa el tamaño de los intervalos puede reducirse hasta formar una curva la cual representa la distribución de frecuencia.

Si la frecuencia de observaciones en cada intervalo se expresa como porcentaje del total de observaciones el área bajo la curva de la distribución de frecuencia es igual a uno.

6.2.4.- La distribución normal.

Muchas dimensiones físicas siguen la simetría de la curva normal o gaussiana o de distribución de frecuencia, la ecuación de la curva normal es:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

La curva normal frecuentemente es expresada en términos de la desviación estándar "Z"

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Ahora la ecuación de la curva normal estándar queda de la siguiente manera:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{z^2}{2} \right]$$

En este caso "Z" se distribuye normalmente con media = cero y varianza = uno.

6.2.5.- Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull se usa en problemas de ingeniería por su versatilidad, originalmente propuesto para describir la vida útil de partes o componentes, tales como engranes, baleros y componentes electrónicos. Los dos parámetros de la función de Weibull se describen así:

$$f(x) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{x}{\theta} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\theta} \right)^m \right]$$

Donde $f(x)$ = Distribución de frecuencia de la variable aleatoria x

m = Parámetro de forma del material o módulo de Weibull

θ = Parámetro de escala, algunas veces llamado el valor característico

La distribución de la frecuencia acumulativa esta dada por:

$$f(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\theta} \right)^m \right]$$

reescribiendo la ecuación anterior

$$\frac{1}{1 - F(x)} = \exp \left(\frac{x}{\theta} \right)^m$$

$$\ln \frac{1}{1 - F(x)} = \left(\frac{x}{\theta} \right)^m$$

$$\ln \left[\ln \frac{1}{1 - F(x)} \right] = m \ln x - m \ln \theta = m (\ln x - \ln \theta)$$

La cual es una línea recta de la forma $Y = mx + c$, cuando la probabilidad de falla es graficada contra "x" en la hoja graficada de Weibull obtenemos una línea recta y la inclinación viene siendo el módulo de Weibull "m", entre más grande es la inclinación más pequeña la dispersión en la variable aleatoria "x".

Si " x " = θ entonces

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\theta}{\theta} \right)^m \right] = 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{e}$$

por lo tanto

$$F(x) = 1 - \frac{1}{2.718} = 0.632$$

Para alguna distribución de Weibull la probabilidad de que sea menor o igual al valor característico es de 0.632. Por lo tanto θ puede dividir el área bajo la función de distribución de probabilidad entre 0.632 y 0.368 para todos los valores de "m".

Si los datos no se grafican en una línea recta puede ser que la distribución de Weibull tiene el valor mínimo X_0 el cual es más grande que $X_0 = 0$

6.2.6.- Distribución gamma.

Los dos parámetros Gamma de la función densidad son usados para describir variables aleatorias que tienen la forma:

$$f(x) = \frac{\lambda^\eta x^{\eta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\eta)} \quad \text{para } x > 0; \lambda > 0; \eta > 0$$

donde $\Gamma(\eta)$ = función Gamma = $\int_0^\infty x^{\eta-1} e^{-x} dx$

η = factor de forma

λ = factor de escala

6.2.7.- Distribución exponencial.

La distribución exponencial es un caso especial de la distribución Gamma para cuando $\eta = 1$

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{para } x > 0 \text{ y } \lambda > 0$$

También se considera a la distribución exponencial como un caso especial de la distribución de Weibull cuando $\eta = 1$, $x_0 = 0$, y $x = t$

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta}$$

La distribución de Weibull para los modelos de probabilidad de falla de un componente son útiles para un balero o una flecha, pero no para un sistema completo como puede ser una bomba para lo cual el sistema de distribución exponencial es la más adecuada.

6.2.8.- Distribuciones de variables discretas.

Hay importantes problemas de ingeniería en donde las variables aleatorias toman solo valores discretos. Estos tipos de situaciones ocurren en una estación de

control de calidad en una línea de producción en donde una parte puede ser aceptada o rechazada.

Una variable aleatoria sigue a una distribución binomial cuando las siguientes 4 características ocurren

1. - Existen "n" pruebas
2. - Las pruebas son independientes
3. - Cada prueba solo tiene dos posibles resultados
4. - La probabilidad del evento permanece constante de prueba en prueba

La probabilidad de ocurrencia de algún valor de $r = 0, 1, 2, \dots, n$ en "n" pruebas esta dada por

Cada prueba de la distribución binomial tiene solo dos posibles resultados

$$P(\text{número de defectos "d"}) = \frac{\binom{N_p}{d} \binom{N_q}{n-d}}{\binom{N}{n}}$$

donde N = tamaño del lote

n = tamaño de la muestra

N_p = número de fallas en el lote

N_q = número de éxitos en el lote

d = número de fallas en una muestra

y

$$\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}$$

para un caso generalizado

6.2.9.- Probabilidad en el diseño.

Es totalmente natural el hecho que las propiedades del material, las dimensiones del componente y las cargas aplicadas externamente se manejen en forma estadística.

Asimismo en la Ingeniería, el diseño convencional considera factores de seguridad bastante altos en algunos tipos de industrias como la espacial o la aeronáutica, los cuales tienden a reducirse o a hacerse mas precisas con el uso de aproximaciones probabilísticas.

Si consideramos nuevamente el ejemplo de la introducción y tomamos un solo espécimen que esta sujeto a cargas estáticas y que desarrolla una tensión, la variación de las cargas en el área seccional del componente resultan en la distribución de tensiones mostradas en la figura 6-2.

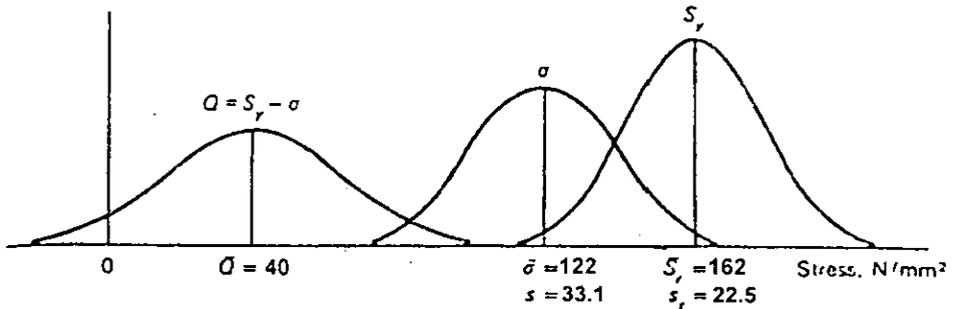


Fig. 6.2. DISTRIBUCION DE EL ESFUERZO DE CEDENCIA S_y Y EL ESFUERZO

Donde la media es $\bar{\sigma}$ y la desviación estándar es s , la resistencia a la tracción o esfuerzo de cedencia del material S_y tiene una distribución de valores dados por \bar{S}_y y

σ por lo tanto las 2 distribuciones de frecuencia se traslapan y es posible que $\sigma > S_y$ lo cual es una condición de falla.

La probabilidad de falla esta dada por la siguiente formula:

$$P_f = P(\sigma > S_y)$$

La confiabilidad "R" esta definida por

$$R = P(\sigma < S_y) = 1 - P_f$$

Si nosotros restamos la distribución del esfuerzo de la distribución de tracción o esfuerzo de cedencia, el resultado es la distribución $S_y - \sigma$ que se muestra en el lado izquierdo de la figura anterior (6-2).

Ahora necesitamos poder determinar la media y la desviación estándar de la distribución "Q" que resulta de la suma de 2 variables independientes aleatorias "x" y "y" esto es

$$Q = x \pm y$$

refiriéndonos a partir de la fig. (6-2) antes mencionada nosotros vemos que la distribución

$$Q = S_y - \sigma$$

y tiene un valor medio

$$\bar{Q} = 75 - 35 = 40 \quad y$$

$$S_Q = \sqrt{(33.1)^2 + (22.5)^2} = 40$$

la parte de la distribución a la izquierda de $Q = 0$ representa el área para la cual

$$S_y - \sigma \quad \text{es un número negativo, que es, } \sigma > S_y$$

ocurriendo la falla.

6.2.10.- Variabilidad en las propiedades del material.

La fractura y la fatiga son propiedades mecánicas que muestran gran variabilidad haciendo que las propiedades de Resistencia a la tracción y Resistencia a la Tensión se extiendan más allá de los límites normales.

Los datos que generalmente aparecen en publicaciones especializadas casi nunca tienen los valores medios, y de desviación estándar, sin embargo a pesar que, probabilísticamente hablando, no todas las propiedades mecánicas son normalmente distribuidas, este tipo de distribución es una buena aproximación que casi siempre resulta de un diseño conservador.

6.3 Aspectos probabilísticos de la mecánica de las fracturas.

Las mediciones de resistencia mecánica en materiales frágiles, como el vidrio, los cerámicos o metales con condiciones de baja ductilidad que se comportan de manera frágil muestran una gran variabilidad de resultados por lo que requieren un análisis estadístico. Por lo tanto las propiedades mecánicas no se expresan con un número, sino debemos pensar en términos de probabilidad de falla de un esfuerzo dado.

Un aspecto importante del comportamiento estadístico es que la resistencia de un material sólido frágil presenta un efecto de tamaño pronunciado, en el cual la resistencia decrece cuando se incrementa en tamaño o en volumen la probeta, así también cuando la longitud de la grieta es pequeña la resistencia aumenta como se vio en la tenacidad a la fractura.

La estadística de la fractura en los materiales frágiles tiene algunas complicaciones en comportamiento que no presentan los materiales dúctiles. Se puede considerar que la fractura se inicia en una discontinuidad o concentración de esfuerzos.

Sin embargo, un material frágil cuya resistencia es determinada por la distribución de grietas, puede que en la distribución de esfuerzos presente una discontinuidad, la probabilidad de falla es baja porque el esfuerzo se realiza en un volumen pequeño de material. La falla puede ocurrir en la estructura en donde el pico del esfuerzo es bajo, pero se tiene un volumen grande de material.

Una teoría de la estadística de las fracturas frágiles asume que las probetas están divididas en muchos elementos en donde cada uno contienen una grieta. La suposición más usual es que no haya una acción recíproca entre las grietas de los diferentes elementos. La resistencia de la probeta es determinada por el elemento con la grieta más grande. La resistencia a la fractura de materiales frágiles no se determina con un rango de valores de la distribución de grietas, sino por la grieta más peligrosa. La figura 6.3 muestra la distribución de frecuencia calculada del esfuerzo de fractura en un material frágil como una función del número de grietas N .

Se muestra cómo la dispersión del esfuerzo de fractura disminuye cuando aumenta el número de grietas, así también cuando el número de grietas aumenta el valor medio del esfuerzo de fractura disminuye.

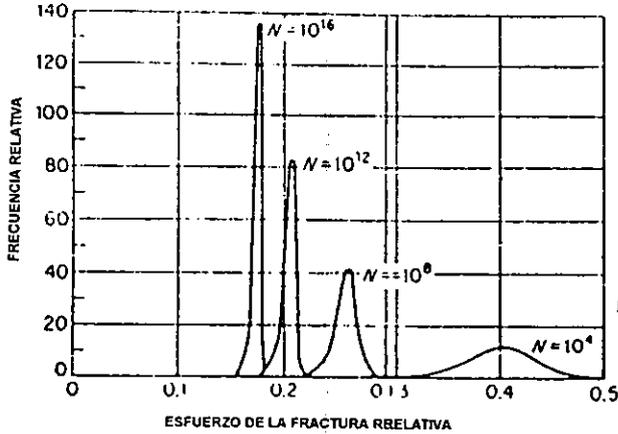


Fig. 6.3.- Cálculo de la distribución de frecuencia del esfuerzo de fractura en función de un número de grietas "N".

La distribución de frecuencia normal o gaussiana se acepta frecuentemente para la distribución estadística de la resistencia a la falla, pero no hay una justificación teórica ó experimental para utilizarla. Por esto la aplicación más general de la distribución de frecuencia en problemas de fractura es utilizar la distribución de Weibull:

$$P(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\theta - x_0} \right)^m \right]$$

donde $P(x)$ = distribución de frecuencia acumulativa de la variable x

m = parámetro de forma, referido como el módulo de Weibull

θ = parámetro de escala, algunas veces llamado valor característico

x_0 = valor mínimo admisible de x

X = valor nominal

Tomando el doble logaritmo natural, la ecuación anterior se transforma en:

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - P(X)} \right) = m \ln (X - X_0) - m \ln \theta$$

el cual es de la forma $y = bx + c$. Se debe disponer de una hoja para la distribución de Weibull en donde permite graficar directamente la probabilidad de falla acumulada contra X .

Aun cuando se aplique la mecánica de la fractura en el diseño es común tomar un factor de seguridad asumiendo condiciones del caso más crítico. Por ejemplo podría asumirse que la grieta inicial es la grieta más grande o larga, que no puede ser detectada con una prueba no destructiva, y por lo tanto, la resistencia a la fractura se asume como el valor más bajo que se espera del material. Esta puede ser una aproximación conservadora, en donde muchos componentes o elementos se descartan para que sirva de análisis del caso más extremo. Para medir el riesgo de probabilidad de falla, el análisis de la mecánica de la fractura se ha desarrollado. La ecuación de la probabilidad de fractura esta dada por:

$$P(x) = \exp(-PNR) \{ 1 - \exp(-PNF) \}$$

donde PNR es el número probable de rechazos en un componente
 PNF es el número probable de elementos que fallaron en un
componente y no fueron detectados por inspección y
fallaron.

Estas cantidades se determinan por 3 distribuciones de probabilidad.

$$PNR = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(a) P(R/a, s) da$$

donde:

$p_n(a)$ da es la preinspección de calidad del material, por ejemplo, el probable número de defectos de dimensión $a \pm \frac{1}{2} da$

$P(R/a, s)$ es la probabilidad de rechazar un componente dado, en donde un defecto actual de dimensión "a" existe, y el método de inspección solo puede detectar un defecto de dimensión "s" o mayor.

y

$$PNF = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(a) \{1 - P(R/a, s)\} P(F/a) da$$

donde $P(F/a)$ es la probabilidad de falla de un componente dado, con un defecto existente de dimensión a.

6.4 Confiabilidad.

Es importante conocer el significado de confiabilidad ya que tal palabra es fácil de entender pero no tan fácil de definir, siendo confiabilidad la probabilidad de que un sistema, componente o artículo va a funcionar sin falla durante un periodo específico de tiempo bajo condiciones de operación especificadas. La disciplina de ingeniería confiable es básicamente un estudio de las causas, distribución, y predicción de fallas.

En términos matemáticos: Si llamamos $R(t)$ a la confiabilidad con respecto a un tiempo t y $F(t)$ a la desconfiabilidad o probabilidad de falla en el mismo tiempo t , y sabiendo que la falla y no falla son eventos mutuamente excluyentes resulta

$$R(t) + F(t) = 1 \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

Si N_0 componentes son puestos a prueba, llamando N_s al número de componentes que no fallaron en un tiempo t y N_r al número que falló entre $t=0$ y $t = t$ resulta:

$$N_s(t) + N_r(t) = N_0$$

y de la definición de confiabilidad:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} = 1 - \frac{N_r(t)}{N_0}$$

El índice de peligro $h(t)$ ó índice de falla instantánea viene dado por el número de fallas durante una unidad de tiempo, por el número de artículos que se probaron en el mismo tiempo.

$$h(t) = \frac{dN_r(t)}{dt} \frac{1}{N_0(t)}$$

En términos de estadística podemos definir el índice de falla $h(t)$ como la probabilidad de que un artículo dado a prueba va a fallar entre un tiempo t , y $t_1 + dt$, cuando este ha logrado sobrevivir un tiempo t_1 .

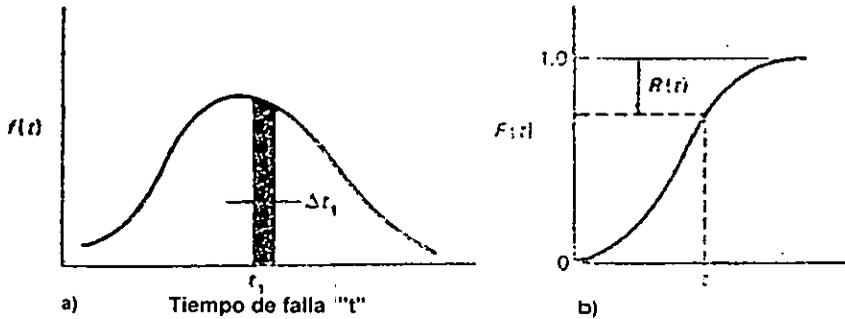


Fig.6.4.-a)Distribucion del tiempo para la falla
b)Distribucion acumulativa del tiempo para la falla

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = P(t_1 \leq t \leq t_1 + dt / t \geq t_1)$$

de la distribución normal de frecuencia estadística:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - R(t))}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt}$$

y del índice de falla:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)}$$

$$\frac{-dR(t)}{R(t)} = h(t) dt$$

$$\ln R(t) = - \int_0^t h(t) dt$$

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t h(t) dt \right] \dots \dots \dots (6.2)$$

El índice de peligro o falla esta dado en términos de 1 por ciento por 1000 h ó 1e-5 por hora. Componentes con un índice de falla en un intervalo de 1e-5 hasta 1e-7 por hora de exposición indican un buen nivel comercial de confiabilidad. Otro camino para definir la ocurrencia de falla es la condición del "tiempo medio entre fallas" (MTBF) del ingles mean time between failures, que más adelante definiremos.

Los tres estados de la curva que se muestran en la figura 6-5(a) es la típica de los componentes electrónicos. En un tiempo corto hay un índice de falla alto debido a la llamada "mortalidad infantil" causada por errores de diseño, defectos de manufactura, o defectos de instalación. Estas fallas rápidamente pueden ser minimizadas mejorando el control de calidad, de la producción, sometiendo las partes a una prueba de resistencia antes de estar en servicio, o hacer un "rodaje" del equipo antes de enviarlos fuera de la planta. Cuando las fallas rápidas dejan el sistema, la falla va a ocurrir con menor y menor frecuencia hasta que eventualmente el índice de falla alcanza un valor constante.

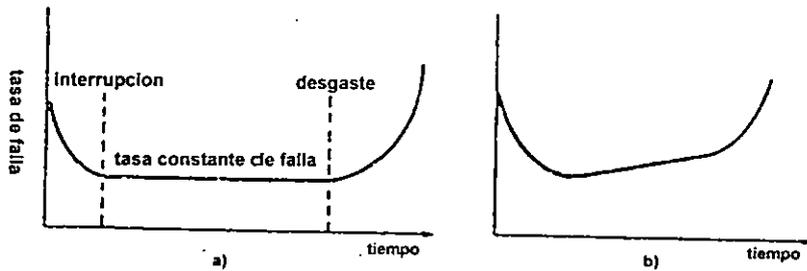


Fig. 6.5.- FORMAS DE LA CURVA DE FALLA .
a) TRES PASOS CURVA TIPICA DEL EQUIPO ELECTRONICO
b) CURVA TIPICA DE FALLA DE EQUIPO MECANICO

El período en el cual el índice de falla es constante es un período en el cual las fallas pueden ocurrir aleatoriamente ya sea por sobrecargas o defectos aleatorios. Estas fallas siguen un patrón no predecible. Finalmente después de que transcurre un largo tiempo satisfactorio, los materiales y componente están ya viejos, con lo cual se desgastan rápidamente, comenzando el período de desuso donde el índice de falla se incrementa rápidamente.

Los componentes mecánicos 6.5. (b) no muestran una región de índice de falla constante, después del período de falla rápida los mecanismos son usados y operan rápidamente hasta que la falla ocurre.

6.4.1.- Índice de falla constante.

Como se mencionó anteriormente existe un período donde el índice es constante, para estos casos podemos considerar $h(t) = \lambda$, por lo tanto la ecuación 6.2 resulta:

$$R(t) = \exp \left\{ - \int^t \lambda dt \right\} = e^{-\lambda t}$$

para lo cual la distribución de probabilidad de índice de falla en este caso es una distribución exponencial negativa.

$$\lambda = \frac{\text{Número de falla}}{\text{número en unidades de tiempo durante el cual todos los artículos fueron expuestos a la falla.}}$$

Habíamos mencionado el tiempo medio entre fallas (MTBF), siendo este el inverso de λ por lo cual si llamamos \bar{T} al inverso resulta:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\text{número en unidades de tiempo durante el cual todos los artículos fueron expuestos a la falla}}{\text{número de fallas}}$$

y de la ecuación resulta que la confiabilidad es igual a:

$$R(t) = e^{-t / \bar{T}}$$

Aunque un componente individual puede no tener una distribución exponencial, en un sistema complejo con muchos componentes la confiabilidad puede aparecer como una serie de eventos aleatorios, con lo cual este sistema seguirá una distribución exponencial de confiabilidad.

6.4.2.- Índice de falla variable.

Como vimos en la figura 6-5(b) los componentes mecánicos no tienen una región constante de índice de falla, como el índice de falla es función del tiempo la relación

exponencial no se aplica. Lo más común es considerar que la falla se distribuya de acuerdo a la función de Weibull, por lo tanto la confiabilidad esta dada por:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^m \right]$$

donde t = tiempo de falla

t_0 = tiempo en el cual $F(t)=0$

θ = característica de vida (parámetro de escala)

m = pendiente de la gráfica de Weibull (parámetro de forma)

sustituyendo en la ecuación de índice de falla:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = m \frac{(t - t_0)^{m-1}}{\theta^m}$$

cuando $m < 1$, $h(t)$ disminuye como t aumenta, parecido al periodo de falla rápida en la curva de tres periodos. Cuando $1 < m < 2$, $h(t)$ aumenta con el tiempo. Cuando $m = 3.2$, la distribución de Weibull comienza a ser una buena aproximación a la distribución normal.

6.4.3.- Sistema confiable.

La mayoría de los sistemas contienen una serie de elementos en donde la confiabilidad global del sistema depende de como los componentes individuales con sus índices de falla respectivos son arreglados.

Si los componentes están arreglados de tal manera que la falla de cualquier elemento causa la falla del sistema, se dice que está arreglado en serie. Donde la confiabilidad resulta:

$$R_{\text{sistema}} = R_A \times R_B \times \dots \times R_N$$

de la ecuación se observa que si hay muchos componentes arreglados en serie la confiabilidad global del sistema baja rápidamente, la mayoría de los productos de consumo común presentan este arreglo.

Existe un mejor arreglo para los componentes, en el cual es necesario que todos los elementos en el sistema fallen con cierto orden para que el sistema falle. Con este arreglo se dice que hay confiabilidad paralela:

$$R_{\text{sistema}} = 1 - (1 - R_A) (1 - R_B) \dots (1 - R_N)$$

Un sistema el cual es arreglado para dar confiabilidad paralela se dice que es un sistema redundante, hay varias maneras para que el sistema se lleve a cabo, existen sistemas con una redundancia activa total en el cual cualquier elemento puede fallar antes de que el sistema falle, otros sistemas tienen una redundancia activa parcial en el cual ciertos componentes pueden fallar sin causar daño alguno al sistema pero uno o más elementos deben seguir trabajando para que el sistema no falle. Un ejemplo clásico es un avión de 4 motores que puede volar con 2 motores pero puede perder estabilidad y control si solo 1 motor está operando. Este tipo de sistema paralelo es analizado utilizando la distribución binomial.

Otro acercamiento a la redundancia es el emplear un sistema de respaldo (standby) el cual se activa solo cuando es necesario. Para el análisis de este sistema se utiliza la distribución de Poisson.

La confiabilidad en un sistema de dos componentes, uno de los cuales esta de respaldo es:

$$R(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t)$$

si las unidades no son idénticas pero tienen índice de falla λ_1 y λ_2 la confiabilidad viene

dada por:

$$R(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + e^{-\lambda_2 t}$$

En la práctica el uso de un sistema redundante con respaldo tiene una mejor confiabilidad que un sistema redundante solo. Sin embargo la factibilidad del sistema con respaldo depende completamente de la confiabilidad de los sensores y unidades de encendido de la unidad de respaldo, tomando este factor la confiabilidad resulta ser muy alta.

6.4.4.- Reparación y mantenimiento.

Un importante factor a tomar en cuenta en la confiabilidad es el manejo del mantenimiento y reparaciones del sistema, si un elemento que ha fallado puede ser reparado mientras es reemplazado por un elemento del sistema redundante para continuar dando servicio la confiabilidad global del sistema se mejora. Si los componentes sujetos a desgaste pueden ser reemplazados antes de que fallen, la confiabilidad también será mejorada.

El mantenimiento preventivo se realiza con el propósito de disminuir la falla en el sistema. Las rutinas de mantenimiento como inspección, ajuste, lubricación, limpieza, generalmente no afectan la confiabilidad, pero la ausencia de las rutinas de mantenimiento pueden acelerar la falla. El reemplazo de los elementos antes del

desgaste está basado en el conocimiento de la distribución estadística del tiempo de falla. Para esto una pequeña parte de la vida útil del sistema es sacrificado con tal de aumentar la confiabilidad. Este aspecto se facilitaría si fuera posible monitorear algunas propiedades de los componentes que nos indicarán el desgaste u algún otro aspecto para poder cambiar el elemento lo más cercano al tiempo de falla.

La reparación de un elemento en un sistema en serie no mejora la confiabilidad, ya que el sistema no está operando, sin embargo disminuyendo el tiempo de reparación acortará el período en el cual el sistema está fuera de servicio, por lo tanto el mantenimiento y la disponibilidad deben de mejorarse. Un sistema redundante continua operando cuando un elemento ha fallado, pero puede comenzar a ser vulnerable si el componente no es reparado y colocado de nuevo en servicio. Para considerar este hecho es necesario definir algunos términos adicionales:

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

Donde: MTBF= tiempo medio entre fallas

MTTF= tiempo medio para la falla (del inglés Mean Time To Fail)

MTTR = tiempo medio de reparación (del inglés Mean Time To Repair)

Si el índice de reparación $r = 1 / MTTR$ entonces para un sistema redundante:

$$MTTF = \frac{3\lambda + r}{2\lambda}$$

6.4.5.- Índice de mantenimiento

Es la probabilidad de que un componente o sistema que ha fallado sea reestablecido en servicio dentro de un tiempo dado.

El MTTF y el índice de falla son medidas de confiabilidad pero MTTR y el índice de reparación son medidas de mantenimiento y a partir de estas resulta la ecuación de índice de mantenimiento:

$$M(t) = 1 - e^{-rt} = 1 - e^{-t / \text{MTTR}}$$

donde: $M(t)$ = índice de mantenimiento

r = índice de reparación

t = tiempo permisible para llevar a cabo la reparación

Es importante tratar de predecir el índice de mantenimiento durante el diseño de un sistema de ingeniería. Los elementos a tomar en cuenta en este índice son: a) el tiempo requerido para determinar que la falla ha ocurrido y diagnosticar las actividades necesarias para la reparación. b) el tiempo para llevar a cabo la reparación. c) el tiempo requerido para revisar el equipo y establecer que la reparación ha sido efectiva y que el sistema puede ser operado.

Algo importante en el diseño es el equilibrio entre MTTR y el costo, si el MTTR se fija muy corto en cuanto a horas-hombre que lleven a cabo la reparación, entonces se necesitará un gran equipo de mantenimiento con lo cual el costo se incrementaría.

Disponibilidad.- La disponibilidad es un concepto que involucra la confiabilidad e índice de mantenimiento, es la porción del tiempo en que el sistema esta trabajando con respecto al tiempo total, cuando este ha sido determinado para un periodo largo de trabajo.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{tiempo total de trabajo}}{\text{tiempo total de trabajo} + \text{tiempo muerto}}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{tiempo total de trabajo}}{\text{tiempo total de trabajo} + (\# \text{ de fallas} \times \text{MTTR})}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{tiempo total de trabajo}}{\text{tiempo total de trabajo} + (\lambda \times \text{tiempo total de trabajo} \times \text{MTTR})}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{1}{1 + \lambda \text{ MTTR}}$$

6.5 Confiabilidad para el diseño.

De la definición de confiabilidad mencionada anteriormente podemos decir que la confiabilidad para el diseño es todo un proceso en el cual los principales objetivos son que dicho diseño no falle antes de tiempo, que se tenga la seguridad y confianza de que el diseño no fallará. Cabe mencionar que el concepto de falla lo debemos entender con dos significados uno se refiere a la falla mecánica que es una deficiencia o defecto superficial interno en el material y que por ende merma la resistencia del mismo y otro es que no trabaje o trabaje mal nuestro diseño, para lo mencionado anteriormente nos debemos apoyar en la última definición.

Las estrategias de diseño usadas para asegurar confiabilidad pueden caer en dos grandes extremos. El primero de ellos es un acercamiento de "seguridad-falla" en el cual se identifica el lugar débil en el sistema o componente y se monitorea esa debilidad. El otro extremo es un acercamiento llamado "muerte repentina" el cual consiste en que todos los componentes tengan la misma vida con lo que se cumpliría la premisa de que todo va a fallar al mismo tiempo. Frecuentemente en el primer extremo cuando se monitorearon las debilidades se uso un modelo a escala el cual se sometió a

pruebas y se observó el comportamiento de dichas debilidades. El otro extremo es que dentro del proceso de diseño se analizan y se prueban todos los sistemas y se diseñan para que todos fallen al mismo tiempo.

Normalmente para hacer las pruebas de verificación nos lleva a tener un prototipo a escala real. Estas pruebas involucran condiciones de servicio reales las cuales nos ayudan a detectar deficiencias en el material o el diseño y así poder corregirlas antes de que se lleve a cabo la producción.

La información obtenida de las pruebas y análisis son usadas para establecer las especificaciones del material y del proceso de fabricación y el proceso del control de calidad en la manufactura. Estas especificaciones se pueden modificar como el resultado de la experiencia laboral y empezar las bases para las prácticas de inspección y mantenimiento que deben ser aplicadas. Finalmente cuando el sistema se convierte en obsoleto o el costo de mantenimiento es muy alto, el sistema está listo para ser retirado.

Según la experiencia laboral existen 5 categorías generales por las cuales un diseño puede funcionar incorrectamente, las cuales se vuelven a mencionar a continuación:

1. Errores de diseño. Tales como una información incompleta sobre las cargas, condiciones de ambiente, error de cálculo, o una mala selección de materiales.
2. Defectos por manufactura.
 - a) Mal acabado superficial o contornos agudos que propician una falla por fatiga.
 - b) Una descarburización o grietas por un templado o algún tratamiento térmico al cual fué sometido el material.
3. Mantenimiento. La mayoría de los sistemas ingenieriles son diseñados para que reciban un mantenimiento adecuado cada determinado tiempo, por lo cual si no reciben

este mantenimiento su índice de falla se incrementará, una solución podría ser que se hagan los productos libres de mantenimiento.

4.- Sobrecarga de las condiciones de operación especificadas. Si el operador excede los límites de temperatura, velocidad, etc. el diseño fallará.

5.- Factores ambientales. Cuando el equipo es sometido a condiciones de ambiente para las cuales no fue diseñado tales como: lluvia, humedad, hielo; su vida útil se acortará.

Hay una gran variedad de métodos usados en el diseño ingenieril para mejorar la confiabilidad de los cuales mencionaremos algunos a continuación:

1. Margen de seguridad o Factor de seguridad. -Es un intervalo para el cual nuestro diseño tiene la confiabilidad de que no fallara como ya se mencionó en el capítulo 5.
- 2.- Redundancia .- Uno de los caminos más efectivos para incrementar la confiabilidad es la redundancia y esta puede presentarse en 2 formas principalmente, una de ellas es la redundancia paralela que ya se mencionó anteriormente la cual consiste en tener un sistema funcionando a través de 2 o más componentes o subsistemas los cuales trabajan aisladamente y si alguno de estos fallará, el otro quedaría de soporte, esto lo podemos ejemplificar con un anuncio luminoso el cual contiene 10 focos conectados en paralelo, si alguno de los focos llegase a fallar el anuncio seguiría iluminado, aunque sea con 9 focos y no teniendo la misma luminosidad.

Otro método para incrementar la redundancia es tener un sistema de respaldo el cual trabajará si el sistema principal falla un clásico ejemplo de este sistema es una planta diesel que genera electricidad en un hospital. La unidad de respaldo esta compuesta por sensores para detectar la falla, la debilidad de estos sistemas esta precisamente en los sensores que activan el sistema de respaldo.

3.- Durabilidad.- La selección de materiales y el diseño de detalle juegan un gran papel para este objetivo ya que de estos depende que el sistema resista a la corrosión, erosión, impacto, fatiga y desgaste. Esto usualmente requiere de la decisión de cuanto dinero se piense gastar en el diseño, con la ventaja de que se ahorrará dinero en mantenimiento y se incrementará la vida útil del diseño. El ciclo de vida es el principal factor que se utiliza para aplicar esta técnica.

4.- Tolerancia al daño.- La detección de grietas y propagación de las mismas tienen una gran importancia en cualquier diseño. Una tolerancia en el daño al material o estructura depende del tamaño y profundidad de la grieta. En la figura 6-6 podemos apreciar algunos conceptos de la tolerancia al daño.

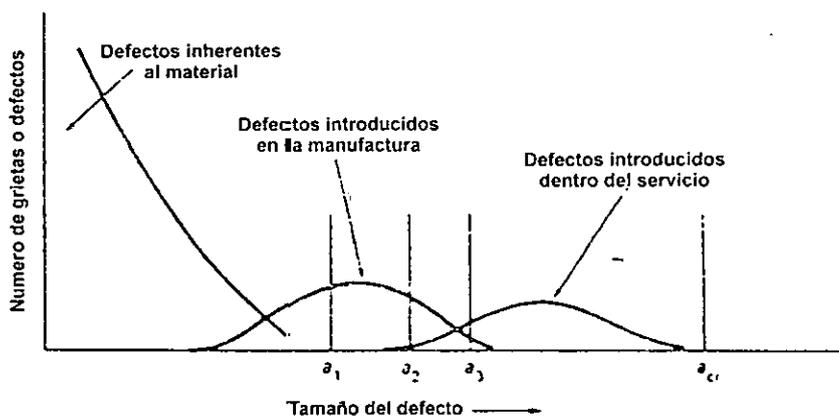


Fig. 6.6.-Distribución de los defectos en componentes ingenieriles

Como podemos apreciar las pequeñas grietas inherentes al material se observan en el lado izquierdo. Estas son inclusiones, porosidades, defectos de superficie y

raspaduras. Si estas son menores que a_1 , estas no crecerán apreciablemente en el servicio o funcionamiento de la pieza. Adicionalmente se pueden introducir más defectos con el proceso de manufactura. Si estas son más grandes que a_2 , se eliminarán las piezas como defectuosas. Como quiera que sea, algunas grietas se presentarán en los componentes puestos en servicio y estas crecerán hasta el tamaño de a_3 , las cuales pueden ser detectadas por técnicas de evaluación no destructivas con la ventaja de que se analizan puestas en funcionamiento las piezas o componentes. Más adelante el material puede soportar una tolerancia al daño mucho menor que el tamaño de a_{cr} .

5.- Fácil inspección.- Idealmente sería el utilizar técnicas de evaluación no destructivas visuales pero algunos diseños especiales no lo permiten, con lo que se tendrían que usar técnicas de evaluación no destructivas diferentes tales como ultrasonido u otras (ver tabla de ensayos no destructivos). Si el sistema no está disponible para realizar la inspección podemos bajar el nivel de esfuerzo hasta que la grieta no llegue a un tamaño crítico, pero para esta situación se sacrificaría el sistema.

6.- Simplicidad.- La simplificación de componentes y ensambles reduce los errores e incrementa la confiabilidad. Los componentes que pueden ser ajustados por operadores o en el mantenimiento son mínimos y el equipo utilizado para tales ajustes es sencillo es lo que incrementa la confiabilidad del diseño.

7.- Especificaciones.- Entre mayor sea el grado de especificaciones en un diseño mayor será la confiabilidad de este; siempre que sea posible se deben considerar las especificaciones sobre las características del material, pruebas necesarias para evaluar

el material, tolerancias y características del proceso de manufactura, procedimiento de instalación, mantenimiento y uso.

Se debe procurar estandarizar las especificaciones para mejorar la confiabilidad ya que los materiales y componentes tienen una historia de uso conocida por lo tanto su confiabilidad es conocida.

8.- Costo de la confiabilidad.- La confiabilidad involucra un aumento en el costo, pero el costo resulta menor que si fuera un diseño no confiable. El costo de la confiabilidad proviene de un costo extra en el diseño y la producción de componentes más confiables.

La figura 6-7 muestra la gráfica del costo vs confiabilidad.

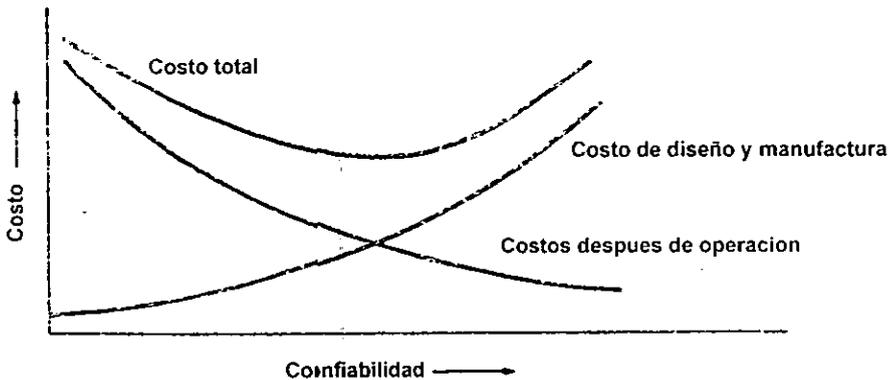


Fig. 6.7.-Influencia de la confiabilidad sobre el costo

El costo del diseño y manufactura se incrementa en un producto confiable. El costo del producto después de ser entregado al consumidor disminuye al aumentar la confiabilidad, ya que se puede dar una mayor garantía, crece la reputación del

proveedor, etc. Con lo cual contrarresta el costo. La suma de las dos curvas nos da el nivel del costo total.

6.6 Conclusiones.

En la actualidad el ingeniero no solo diseña para evitar la falla sino que también sus diseños los realiza para que tengan una alta confiabilidad, donde ésta no solo significa que no falle, sino que funcione durante un tiempo determinado. Existen varios elementos para poder evaluar la confiabilidad como ya se mencionaron anteriormente. Uno de estos elementos es el índice de falla el cual nos indica la probabilidad de que un elemento falle en un tiempo $t_1 + dt$ cuando ya ha logrado funcionar un tiempo t_1 .

Dependiendo de los elementos a evaluar se selecciona la función del índice que se necesite ya que no todos los elementos siguen una misma distribución, por ejemplo los elementos electrónicos presentan una sección con un índice de falla constante y se representan con una distribución exponencial. En cambio los elementos mecánicos no presentan en ninguna región un índice de falla constante sino que varía con el tiempo y al variar ya no es posible utilizar una simple distribución exponencial por lo cual se recurre al uso de la distribución de Weibull que es ampliamente utilizada para describir la vida de varios elementos mecánicos.

Para conocer la confiabilidad en un sistema debemos conocer también como arreglar los componentes que van a conformar el sistema, ya que, existen varios arreglos y estos dependen de la confiabilidad que se necesite, por ejemplo si se arregla un sistema en serie la falla de un elemento propiciará la falla del sistema y entre más elementos tenga mayor será el índice de falla, en cambio si se realiza un sistema en paralelo necesita cumplir una serie de "requisitos" para que el sistema falle, más aun, si se quiere una mayor confiabilidad se puede utilizar un sistema en paralelo con

respaldo el cual se activa en caso que falle el primer sistema. Cuando sea necesario utilizar elementos con un índice de falla bajo el diseño debe ser tal que el elemento pueda ser fácilmente reemplazado. Debido a los diferentes arreglos existentes se debe de tomar el que más convenga según las necesidades y prioridades de uso.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

En el diseño de piezas de maquinaria y miembros estructurales, es responsabilidad de los ingenieros el proporcionar un margen de seguridad, por ejemplo, el asegurar que la pieza de la maquinaria sea segura cuando se opera bajo condiciones normales de operación. El *factor de seguridad* (o factor de diseño, N) se define como la relación que existe entre el esfuerzo último y el esfuerzo permitido. El *esfuerzo permitido*, también llamado esfuerzo de diseño, esfuerzo de trabajo, o esfuerzo de seguridad, es el máximo nivel de esfuerzo que una pieza puede permitir que se presente bajo condiciones de operación. Para la determinación del esfuerzo permitido, son primordiales las consideraciones del tipo de carga que actúa sobre la pieza (estática, impacto, fluctuante, etc.), y el material del cual se fabrica la pieza. La ductilidad de un material, al igual que su esfuerzo y rigidez, puede ser evaluada debido a que el modo de falla de un material dúctil varía dramáticamente respecto al material frágil, como la fundición de hierro gris, algunos plásticos, o algunos aceros tratados térmicamente. La necesidad de un factor de seguridad es muy evidente cuando el conocimiento está incompleto en cuanto a 1) posibilidad de soportar altas cargas inesperadas en una estructura, 2) el grado de esfuerzos residuales dentro de un material debido a los procesos de manufactura, 3) homogeneidad total por toda la estructura interna de un material, 4) los antecedentes de aplicación de carga del material desde su fabricación, y 5) numerosas, pero necesarias, suposiciones utilizadas en los procesos de análisis y diseño que puedan llevar a errores apreciables.

Se han observado que las causas para que un sistema no sea confiable depende principalmente de:

- errores de diseño
- defectos de manufactura
- errores en el mantenimiento
- exceder límites de diseño
- factores ambientales

Para lograr un diseño confiable hay que tomar en cuenta los siguientes factores antes mencionados así como también tomar otros aspectos como son:

- usar un margen de seguridad
- usar un sistema redundante
- tomar en cuenta la durabilidad
- dar tolerancia al daño
- hacer inspecciones al sistema
- estandarizar

Teniendo los conocimientos de un buen análisis de falla en donde nos diga ¿porqué? y ¿cómo? fallaron los materiales, teniendo un buen diseño y tomando en cuenta los aspectos de confiabilidad, ahora si podemos seleccionar un material óptimo para poder evitar la falla y asegurar que tenemos un diseño confiable.

Por lo que debemos de concluir que, se debe seleccionar el material en base al tipo de carga, el tipo de esfuerzo, la temperatura y ambiente de operación para que con estos datos se utilicen las herramientas vistas con anterioridad y maximizar el desempeño del material.

Asimismo una vez que ha fallado la pieza se puede también determinar la causa o las causas de la falla mediante el cuestionario de análisis de falla el cual nos indica que la falla se puede deber a:

- 1).- Deficiencias en el diseño
- 2).- Deficiencias en la selección de materiales
- 3).- Deficiencias en la manufactura
- 4).- Exceder límites de diseño
- 5).- Factores del medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA

1.- Materials Selection in Mechanical Design

Ashby M.F.
Edit. Pergan Monpress, 1992

2.- Manual del Ingeniero Mecánico

Avallone Eugene A.
Edit. Mc. Graw Hill, 1995

3.- Computer Integrated Design and Manufacturing

Bedworth D. D.
Henderson M. R.
Edit. Mc. Graw Hill, 1991

4.- Failure Analisis

Crank J.
Edit. Mc. Graw Hill, 1989

5.- Engineering Design

Dieter G. E.
Edit. Mc. Graw Hill, 1987

6.- Selection of Materials and Manufacturing Process for Engineering Design

Farag M. M.
Edit. Prentice Hall, 1990

7.- Conceptual Design for Engineering

French M. J.
Edit. Mc. Graw Hill, 1985

8.- Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica

Juvinall Robert C.
Edit. Limusa, 1991

9.- Selection of Engineering Materials

Lewis G.
Edit. Prentice Hall, 1990

10.- The Mechanical Design Process

Ullman D. G.
Edit. Mc. Graw Hill, 1992